



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

INGENIERIA TÉCNICA INDUSTRIAL

ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

**“DESARROLLO DE UN SENSOR DE NIVEL
CON FIBRA ÓPTICA PARA LA MEDIDA DE
COMBUSTIBLE EN UN PARAMOTOR”**

AUTOR: JUAN JOSÉ VIERA ROMERAL

ABRIL, 2008

DIRECTORA: CARMEN VÁQUEZ GARCÍA



INDICE

1. ALCANCE Y OBJETIVOS	10
1.1 Estructura del presente documento	11
2. INTRODUCCIÓN	12
2.1 Evolución de la tecnología POF	13
2.2 Aplicaciones de la fibra óptica POF	14
2.3 Perspectivas de uso	16
2.4 Pérdidas de POF	19
2.5 Emisores y detectores para POF	20
2.6 Sensores POF	24
2.7 Fabricantes	29
3. EL PARAMOTOR	30
3.1 Estructura	32
3.2 Trayectoria habitual de vuelo	37
3.3 Elementos electrónicos comerciales que puede incorporar	38
3.4 Medida del nivel de combustible y preferencias de los usuarios	42
4. DEFINICIÓN DE LA APLICACIÓN	44
4.1 Bloque Emisor	45
4.2 Alimentación	47
4.3 Bloque “cable de fibra”	48
4.4 Bloque “receptor”	51
4.5 Bloque “decodificación y de monitorización”	53



5. PROTOTIPOS DE SONDAS OPTICAS Y CARACTERIZACION	59
5.1 Principio de funcionamiento	60
5.2 Configuraciones básicas de prototipos de sondas y caracterizaciones	61
5.3 Características del depósito y la medida	62
5.4 Medidas en prototipos de sondas sobre alambre	64
5.4.1 Medidas sobre aire y agua de todas las configuraciones	64
5.4.2 Medidas modificando la longitud de onda	70
5.5 Medidas en galga sobre superficie plana	75
5.5.1 Medidas en galga completamente pelada	75
5.5.2 Medidas en galga pelada por tramos	79
5.6 Medidas en hélice a través de la válvula	82
5.7 Medidas en galga sobre tubos metálicos	84
5.7.1 Medidas en galga completamente pelada	84
5.7.2 Medidas en galga pelada por tramos	85
6. DESARROLLO DEL DISPOSITIVO	93
6.1 Sistema final	94
6.2 Caracterización de la tensión de salida de los fotodiodos	97
6.3 Diferencias en la tensión de partida. Offset	99
6.4 Estudio de costes	101
7. PROPUESTA DE MEJORAS DEL SISTEMA	104
7.1 Mejoras teóricas al sistema	105
8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	116
8.1 Conclusiones	117
8.2 Trabajos futuros	118



9. PLIEGO DE CONDICIONES	119
9.1 Material utilizado	121
9.2 Presupuesto	122
 10. BIBLIOGRAFÍA	 125
 11. ANEXOS	 130
11.1 Programa del microcontrolador para el ahorro de energía	131
11.2 Planos	132
11.2.1 Esquemático del sistema	132
11.2.2 Foto del sistema completo	133
11.3 Hojas de características	134



INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Agustin-Jean Fresnel (1788 - 1827)
Figura 2.2.	Dimensiones POF y GOF
Figura 2.3.	Redes LAN
Figura 2.4.	Estimación de la implantación de Fibre To The Home 2000-2008
Figura 2.5.	Interior vehículo dotado con sistemas multimedia
Figura 2.6.	Atenuación POF en función de λ
Figura 2.7.	Partes constitutivas de un LED
Figura 2.8.	Diodo LASER
Figura 2.9.	Tipos de fototransistores y símbolo
Figura 2.10.	Esquema fotodiodo PIN
Figura 2.11.	Sensor RC-20 para medida analógica
Figura 2.12.	Esquema de funcionamiento del sistema de protección a peatones
Figura 2.13.	Omron E3X-A41
Figura 2.14.	Esquema de la distribución de la luz emitida por la fibra
Figura 2.15.	Sensores de fibra óptica de desplazamiento
Figura 2.16.	Principio de funcionamiento del sensor de desplazamiento
Figura 2.17.	Logotipos principales fabricantes
Figura 3.1.	Volando en paramotor
Figura 3.2.	Modelo Rak 110
Figura 3.3.	Modelo Mini4-125
Figura 3.4.	Modelo Mini2-135
Figura 3.5.	Depósito de combustible H&E 16L
Figura 3.6.	Arranque tradicional y "de pie"
Figura 3.7.	Trike paramotor
Figura 3.8.	Cuentarrevoluciones con temperatura
Figura 3.9.	Módulo visualización Tiny Tach



- Figura 3.10. Quest! XC
- Figura 3.11. Pantallas de navegación Quest!XC
- Figura 3.12. Pantallas de configuración Quest!XC
- Figura 3.13. IQ One
- Figura 3.14. Casco tipo NAC
- Figura 4.1. Esquema eléctrico y encapsulado emisor HFBR 1528
- Figura 4.2. Distintos modelos de baterías tipo CR y Maxrell CR 2032
- Figura 4.3. ZOC 2032
- Figura 4.4. Serie HFBR
- Figura 4.5. Atenuación típica fibra HFBR-RUS 500
- Figura 4.6. Galga pelada por tramos III
- Figura 4.7. Fotodiodo IF-D91
- Figura 4.8. Chip LM 324
- Figura 4.9. Esquema genérico de un decodificador tipo flash
- Figura 4.10. Alimentación + emisión de luz + decodificación
- Figura 4.11. Diodos HLMP (estándar)
- Figura 4.12. Sistema completo
- Figura 5.1. Detalle tomas depósito de combustible
- Figura 5.2. Detalle sonda cable liso
- Figura 5.3. Detalle sonda hélice sobre alambre
- Figura 5.4. Detalle sonda galga sobre alambre
- Figura 5.5. Gráficas explicativas pérdidas a 850 nm
- Figura 5.6. Sonda galga grande
- Figura 5.7. Detalle sonda galga
- Figura 5.8. Depósito a medio llenado
- Figura 5.9. Detalle sonda galga
- Figura 5.10. Galga pelada por tramos
- Figura 6.1. Caída de tensión en el fotodiodo
- Figura 6.2. Caída de tensión en el fotodiodo. Alimentación a 6 voltios



Figura 6.3.	Gráfico de reparto del presupuesto
Figura 7.1.	Esquema de circuito compensado 1
Figura 7.2.	Esquema de circuito compensado 2
Figura 7.3.	Esquema de circuito compensado 3
Figura 7.4.	Esquema de circuito compensado 4
Figura 7.5.	Esquema de circuito compensado 5
Figura 7.6.	Chip microcontrolador Intel 8051
Figura 7.7.	Sistema con microcontrolador Intel 8051

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Tabla evolución materia prima POF
Tabla 2.2.	Distribución evolución Fibre To The Home
Tabla 3.1.	Características según gama de paramotor
Tabla 5.1.	Potencia de llegada según tipo de sonda con 0 L
Tabla 5.2.	Calibración potencia de llegada según tipo de sonda
Tabla 5.3.	Nuevas medidas para calibrado (hélice y galga) a través de tubo
Tabla 5.4.	Medidas calibrado hélice y galga a $\lambda=660$ nm a través de tubo
Tabla 5.5.	Medidas calibrado hélice y galga a $\lambda=850$ nm a través de tubo
Tabla 5.6.	Modificación de la llegada de potencia al alternar 2 longitudes de onda
Tabla 5.7.	Medidas calibrado galga a $\lambda=660$ nm
Tabla 5.8.	Medidas calibrado hélice a $\lambda=660$ nm a través de tubo
Tabla 5.9.	Medidas calibrado galga a $\lambda=850$ nm
Tabla 5.10.	Medidas preliminares galga sobre plano
Tabla 5.11.	Medidas preliminares galga sobre plano
Tabla 5.12.	Medidas calibrado galga sobre plano II
Tabla 5.13.	Medidas preliminares galga pelada por tramos
Tabla 5.14.	Calibración galga pelada por tramos
Tabla 5.15.	Calibración galga pelada por tramos en dos sectores



Tabla 5.16.	Calibración hélice a través de válvula
Tabla 5.17.	Tabla proporción de litros y alturas
Tabla 5.18.	Calibración galga sobre tubos metálicos
Tabla 5.19.	Alturas de los diferentes niveles de llenado
Tabla 5.20.	Medidas preliminares galga pelada por tramos sobre tubos
Tabla 5.21.	Calibración galga pelada por tramos sobre tubos
Tabla 5.22.	Medidas preliminares galga pelada por tramos sobre tubos II
Tabla 5.23.	Calibración galga pelada por tramos sobre tubos II
Tabla 5.24.	Detalle pérdidas según número de curvas practicadas
Tabla 5.25.	Alturas reales de los diferentes niveles de llenado
Tabla 5.26.	Variación primer escalón de llenado pelada por tramos II
Tabla 5.27.	Calibración galga pelada por tramos sobre tubos III
Tabla 5.28.	Pérdidas surgidas según se van practicando curvas
Tabla 5.29.	Calibración galga pelada sobre tubos III
Tabla 6.1.	Calibración sistema Litros vs V(fotodiodo)
Tabla 6.2.	Tabla de valores de referencia comparados
Tabla 6.3.	Calibración fotodiodo sistema
Tabla 6.4.	Calibración sonda definitiva sistema
Tabla 6.5.	Media de la variación entre puntos consecutivos
Tabla 6.6.	Costes de material
Tabla 7.1.	Nueva calibración sonda definitiva (pelada por tramos VI)
Tabla 7.2.	Tabla de resistencias de carga y tensiones en ambos fotodiodos
Tabla 9.1.	Costes de material
Tabla 9.2.	Costes de personal
Tabla 9.3.	Presupuesto total



ACRÓNIMOS

A

ATEX. Appareils destinés à être utilisés en Atmosphères Explosibles (Equipos adecuados para trabajar en atmósferas con riesgo de explosión)

C

CYTOP. FluoroPel -Cytonix Corporation

D

D2B. Domestic Digital Bus (Bus digital doméstico)

G

GOF. Glass Optical Fibers. (Fibras ópticas de vidrio)

I

IDB. Intelligent Transportation System Data Bus. (Sistema de bus de datos de transporte inteligente)

IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers, (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)

L

LAN. Local Area Network. (Red local)

LASER. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.

LED. Light Emitting Diode (Diodo emisor de luz)

M

MC. Microcontrolador

MOST. Media Oriented Systems Transport (Sistema multimedia orientado al transporte)



O

OTDR. Optical Time Domain Reflectometer. (Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo)

P

PAD. Photon Avalanche Diode. (Diodo de avalancha)

PC. Policarbonato

PCS. Polymer Clad Silica. (Fibra óptica de sílice con vaina de polímero)

PMMA. Polimetilmetacrilato

POF. Plastic / polimer optical fibers. (Fibras ópticas de plástico)

PS. Poliestireno

R

RAM. Random Access Memory. (Memoria de acceso directo o memoria de acceso aleatorio)

S

SI POF. Step index plastic optical fiber. Fibra de plástico de índice escalonado

SMOD. Serial-port mod

V

VCSEL. Vertical Cavity Surface Emitting Laser. (Laser de emisión por superficie de cavidad vertical)



I. ALCANCE Y OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo consiste en la elaboración e implementación de un sistema de medida para el nivel de combustible, particularizando para el caso del depósito de un paramotor, de forma que se busca cumpla con requisitos básicos de precio y dimensiones. Si bien, las conclusiones y prototipos extraídos del presente proyecto son perfectamente extrapolables a cualquier otro ámbito con necesidades de determinación de nivel de líquido.

El sistema debe incorporar fibras ópticas de plástico, como medio transmisor, función para la que son masivamente empleadas, y como elemento sensible. Este aspecto supone una revolución en el marco tecnológico actual, sobre todo si el parámetro de medida empleado es la cantidad de pérdidas a lo largo del cable de fibra. Cabe mencionar que las fibras ópticas de plástico ya han sido empleadas como elementos sensibles en distintos trabajos (que además se presentan en esta memoria), pero nunca en la configuración que se ha ensayado en el presente proyecto.

El alcance abarca el diseño de la cabeza sensora, pasando por el método de transmisión (medio natural donde también son empleadas las fibras ópticas de plástico), decodificación y alimentación. Dicho diseño se ha llevado a cabo mediante la implementación de cada una de las mejoras planteadas cronológicamente y la extracción de conclusiones, en determinados casos accesorias al propósito del proyecto, pero imprescindibles para comprender el potencial de un material relativamente innovador en la industria.

El marco del presente trabajo es el de la ejecución de mi Proyecto Fin de Carrera. En mi opinión supone una oportunidad abierta a la innovación por la vía de la toma de contacto y la experimentación con nuevos materiales (FOP) y la aplicación de los conocimientos adquiridos en la vida académica. Un binomio soportado por el trabajo en laboratorio, la búsqueda de referencias, antecedentes e información de todo tipo a través fundamentalmente de internet y la consulta periódica con la tutora.

Este proyecto se ha desarrollado en el grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas, del Departamento de Tecnología Electrónica, en el marco y con la financiación en material y equipamiento de los proyectos “Dispositivos Fotonicos Para Redes Con Multiplexacion En Longitud De Onda Para Comunicaciones E Instrumentacion TEC2006-13273-C03”, y FACTOTEM-CM, REF. S-0505/ESP/000417.



1.1 Estructura del presente documento

Para facilitar la comprensión se ha tratado de dar una consistencia lógica al texto. De esta forma, en un primer lugar presentamos las principales generalidades del objeto básico de estudio: las fibras ópticas; particularizando para las fibras ópticas de plástico. Asimismo, efectuamos una panorámica sobre la plataforma de desarrollo: el paramotor, forma más sencilla de la aviación ligera y la de menor coste. A continuación presentamos la elaboración del dispositivo completo de forma esquematizada, pues los detalles de las determinaciones de diseño adoptadas se extraen de los prototipos de sondas ideados y más en particular de los datos obtenidos en el laboratorio. A continuación se exponen una serie de conclusiones experimentales y se plantean teóricamente futuros trabajos de profundización y mejora del sistema.

Para terminar, se facilitan las referencias imprescindibles como anexos al trabajo o bien como entradas bibliográficas, ya sean contenidas en la web, anteriores proyectos de reciente ejecución o documentos de apoyo docente. En los anexos se presenta el pliego de condiciones del proyecto y los planos del mismo.



2. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se ofrece una visión general de las fibras ópticas de plástico en permanente comparación con las GOF (*Glass Optical Fibers*), de las que suponen un buen complemento, destacando las ventajas e inconvenientes que las POF presentan. Dado también que se trata de un material relativamente novedoso en la industria, se introduce un análisis de las características que van a determinar sus propiedades y, por tanto, su espectro de aplicación, así como su perspectiva de evolución de uso. Se presenta parte de la gama de transductores que ya existe en base a esta tecnología y alguno de los proyectos emergentes más destacables.

2.1 Evolución de la tecnología POF

En 1820, Augustine-Jean Fresnel (véase figura 2.1) ya conocía las ecuaciones por las que se rige la captura de la luz dentro de una placa de cristal lisa y su ampliación a lo que entonces se conocía como cables de vidrio fue obra de D. Hondros y Peter Debye en 1910. Sin embargo, no fue hasta 1964, cuando Stewart Miller, de los Laboratorios Bell, dedujo maneras detalladas de demostrar el potencial del cristal como medio eficaz de transmisión a larga distancia. [2]



Figura 2.1. Agustín-Jean Fresnel (1788 - 1827)
© www.oftalmo.com

Las primeras fibras ópticas de plástico (POF) irrumpieron en la década de los '60, tiempo después de que se descubrieran las primeras fibras ópticas (hechas de fibra de vidrio). [3] En las décadas posteriores las POF se han desarrollado paralelamente a las GOF (*Glass Optical Fibers*) ya que suponen un complemento perfecto a éstas en aplicaciones de corta distancia, pues sus dimensiones y robustez las hacen mucho más manejables que sus predecesoras.

Los materiales con que se fabricaban las POF, han ido determinando las prestaciones de las mismas en los últimos treinta años durante los cuales se mejoraban sus propiedades:

AÑO	MATERIAL	PERDIDAS (dB/Km)
1968	PMMA (polimetilmetacrilato)	500
1972	PS (poliestireno)	1100
1977	PMMA deuterado	150
1978	PMMA	300
1982	PS	100
1983	PMMA deuterado	≈ 0
1986	PC	450
1990	GI PMMA	100
1992	GI PMMA deuterado	50
1996	CYTOP	50
1998	CYTOP	20
2000	CYTOP	10

Tabla 2.1. Tabla evolución materia prima POF
© System Technical Journal

Las fibras ópticas de plástico tradicionales estaban construidas con material acrílico, PMMA como núcleo (*core*) y su revestimiento (*clad*) estaba formado por polímeros fluorados. A finales de los '90 comenzó a aparecer la segunda generación de POF, a partir de poliperfluorobutenvinileter. Actualmente los campos de utilización de las POF clásicas son aquellos que requieren cortas distancias y poca velocidad de transmisión. Si bien, las fibras más modernas se aplican en telecomunicaciones. [4]

2.2 Aplicaciones de la fibra óptica POF

Las pérdidas de las fibras ópticas de plástico limitan el campo de aplicación de esta tecnología a transmisión a corta distancia (menos de 100 metros), tal es el caso de aplicaciones multimedia del hogar; así como en aviónica, tecnología médica y automoción (debido a la creciente demanda de capacidad de los dispositivos electrónicos dentro del vehículo). También se vienen aplicando en el entorno industrial como sistemas de bus, especialmente cuando se trata de entornos bajo la acción de fuertes campos electromagnéticos, ante los que el funcionamiento de las fibras ópticas permanece inalterable. Su mayor

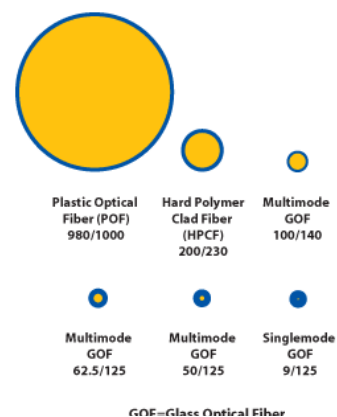


Figura 2.2. Dimensiones POF y GOF
© www.timbercon.com



apertura numérica además de sus dimensiones típicas, para el caso de las SI-POF, es decir, de salto de índice y en el caso concreto de este proyecto, con un diámetro de la cubierta cercano al 1mm y 980 μ m de diámetro del núcleo (véase figura 2.2) [1]; le confieren una manejabilidad extraordinaria lo que les convierte en el complemento perfecto para las fibras ópticas de menos pérdidas por kilómetro y, por tanto, mayor alcance. Así, su instalación se puede llevar a cabo a través de métodos simples, como por ejemplo calentando el extremo de la fibra para reblandecerla y posteriormente ejercer presión sobre un cristal.

Por todo lo anterior, sus conectores y terminaciones son mucho más simples y baratos, ya que la luz puede ser transmitida incluso si el extremo de la misma se encuentra manchado, dañado o incluso si el haz de luz se desplaza ligeramente del centro del núcleo. La robustez de las POF se manifiesta en su resistencia a las vibraciones y a las pequeñas pérdidas que sufren como consecuencia de doblarlas hasta incluso 25mm de radio.

Una aplicación curiosa de estas fibras es que pueden utilizarse en lo que se denomina “iluminación fría”, es decir, iluminación que no produce calor, ya que conduce muy poca luz en el infrarrojo. [6]

2.3 Perspectivas de uso

Existen numerosos estudios acerca de posibles aplicaciones de fibras ópticas en campos como la iluminación mediante transmisión de alta potencia a través de fibras de núcleo rectangular, solución propuesta por el fabricante Liekki [12] así como la reciente irrupción de la nueva fibra para comunicación Ethernet a 10Gbps [22] que responde a las nuevas necesidades multimedia.

En lo que se refiere a las POF, los estudios recientes se centran en los materiales que constituyen tales fibras para dotarlas de mayor resistencia a las altas temperatura. Si bien, las aplicaciones más próximas aparecen en el medio más propicio para las POF como es la conexión a distancias cortas, como medio de transmisión en comunicaciones domésticas, y más concretamente en las redes de área local (véase la figura 2.3), más conocidas como LAN (*Local Area Network*). Una red LAN es un sistema de transmisión de datos, que facilita el compartir los recursos informáticos en un área geográfica relativamente pequeña

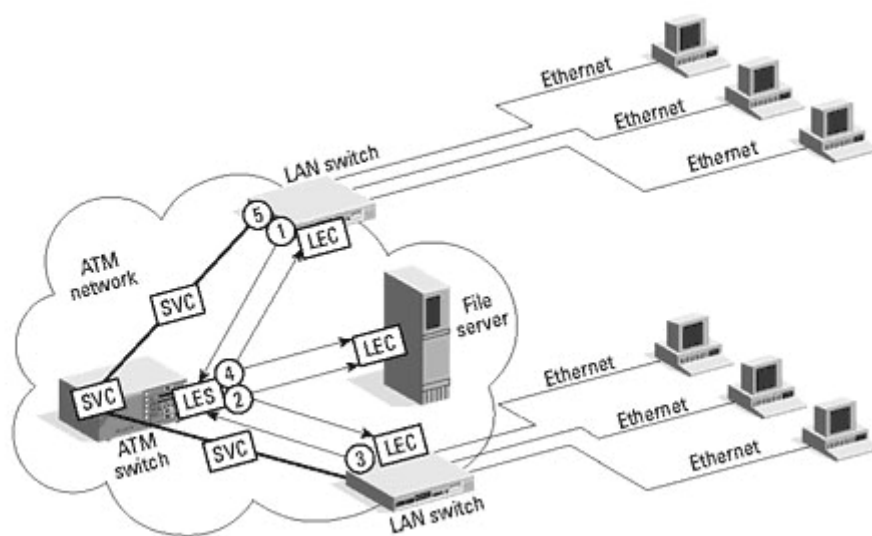


Figura 2.3. Redes LAN
© www.etkinformatika.com

Esto se debe a su menor precio, manejabilidad y conexionado superiores al resto de fibras ópticas. En este sentido, se espera que el mercado de las POF sufra un gran desarrollo, hasta un 3000% en el periodo de años que transcurre de 2000 a 2008, en el fenómeno que ya se ha denominado “*Fibre To The Home*”. [10]

Se espera que los responsables de esta expansión en el uso de las POF sean los siguientes campos y en las proporciones indicadas en la siguiente tabla:[11]

CAMPO	CONTRIBUCIÓN	APLICACIONES
Telecomunicaciones	50%	Transmisión alta velocidad
Automoción	32%	Luces, conexionado en cabina y sistemas de medida
Informática, iluminación, industrial	18%	Redes

Tabla 2.2. Distribución evolución Fibre To The Home
© Model home project in Japan using GI-POF

Además, la industria aeronáutica, así como la ferroviaria se encuentran en un periodo de creciente demanda de expansión en el empleo de comunicación digital, y por tanto de un medio que de soporte a las mismas. Si bien, su idoneidad para estos campos se ha puesto recientemente a debate. [12]

En el siguiente gráfico observamos la contribución de los países pioneros en el uso de POF para el programa Fiber To The Home:

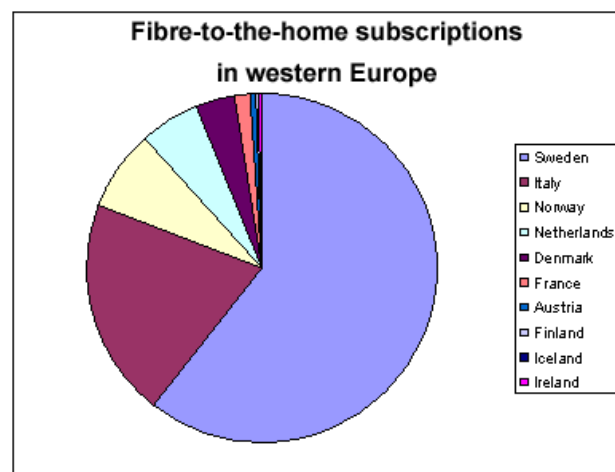


Figura 2.4. Estimación de la implantación de Fibre To The Home 2000-2008
© Model home project in Japan using GI-POF

La utilización de POF en el interior de los automóviles es una aplicación que atrae un gran interés en los últimos años. De hecho, cada vez se dispone de un mayor número de componentes electrónicos y multimedia en los vehículos, existiendo un gran flujo de datos y de información no solo de entretenimiento y comodidad, sino también de seguridad. Es por ello que DaimlerChrysler (Daimler-Benz) introdujo POF en su Mercedes-Benz Serie S por primera vez en 1998, utilizando un bus de datos óptico llamado D2B. Pero pronto se descubrió que hacía falta un protocolo más sofisticado, y a su vez un estándar unificado que abaratará costes. El resultado fue MOST, con más de 10 millones de nodos instalados en la actualidad en un gran número de vehículos: Mercedes Clase E, BMW Serie 7, Porsche Cayenne, Saab 9.3, Audi A8, Volvo XC-90, etc (ver figura 2.4). El transmisor MOST se basa en un LED a 650 nm que permite tasas de datos de hasta 50 Mbit/s, mientras que el receptor es un fotodiodo con pre/post-amplificador. Los dispositivos funcionan a 5 V en un margen de temperaturas de -40 a 85 °C. Sin embargo, la integridad de los datos resulta de enorme importancia en el caso de los sistemas de seguridad críticos de un automóvil, por lo que aparecieron también otros protocolos como *ByteFlight* y *FlexRay*, este último con la opción adicional de un interfaz completamente electrónico.

Conforme crece la complejidad de los dispositivos electrónicos del automóvil, se necesitan mayores tasas de transmisión. Surge así el protocolo IDB-1394, una nueva versión de IEEE-1394 (*FireWire*) para automóviles que permite transferencias de datos de hasta 400 Mbit/s sobre POF. Las POF encuentran un interesante nicho de mercado en el sector de las comunicaciones de datos en el interior de automóviles. Su principal limitación, no obstante, se refiere a las altas temperaturas que se alcanzan en algunas zonas del vehículo (125 °C en el motor, por ejemplo), por lo que actualmente se está investigando en esta línea. Los primeros resultados apuntan a un nuevo tipo híbrido de fibra llamado PCS (*polymer-clad silica*), que consiste en un núcleo de sílice con una cubierta de polímero. Esta fibra mantiene algunas de las ventajas de las POF (núcleo de 200 μ m de fácil conectorización), así como unas pérdidas de tan sólo 8 dB/km a 850 nm (lo que permite la utilización de VCSELs) y altas prestaciones a altas temperaturas, por lo que tal vez el futuro se encuentre por este camino. [29]



Figura 2.5. Interior vehículo dotado con sistemas multimedia
© www.radioptica.com

2.4 Pérdidas de POF

Desde un punto de vista técnico, como ya hemos mencionado, las POF ofrecen menos prestaciones que las fibras ópticas clásicas para transmisiones a larga distancia como consecuencia de sus mayores pérdidas. Así bien, la evolución en su uso se debe a su fácil manejabilidad y precio. Sus pérdidas se cifran en torno a 0.15-0.2 dB por metro, a una longitud de onda $\lambda=650$ nm (láser rojo). [46]

Véase la figura 2.6 donde se aprecia el incremento de las pérdidas de las fibras ópticas de plástico en el infrarrojo.

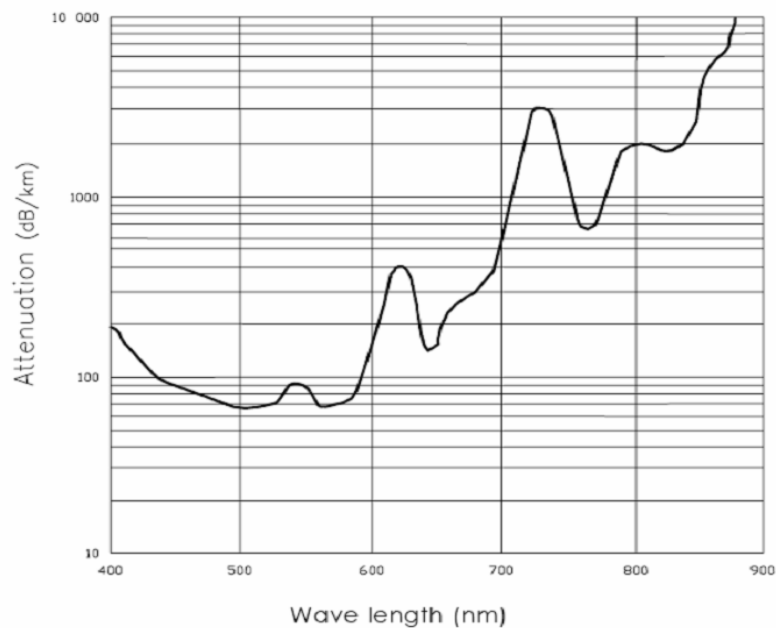


Figura 2.6.. Atenuación POF en función de λ
© www.radioptica.com



2.5 Emisores y detectores para POF

Para transmitir señales luminosas a través de fibras ópticas se requiere en su inicio un elemento emisor que convierta las señales eléctricas en ópticas (E/O) y otro en su final que convierta las señales ópticas en eléctricas nuevamente (O/E). Los emisores y los detectores de luz, deben cumplir con los siguientes requerimientos:

1. Los fotoemisores deben emitir la luz a la misma longitud de onda (λ) que corresponda a la ventana de transmisión de la fibra óptica
2. Generalmente la emisión de luz debe ser en el menor número de modos posible; preferiblemente un solo modo, dependiendo de la aplicación.
3. Es preferible que los emisores y receptores tengan la posibilidad de transmisión analógica y digital.
4. Los detectores deben ser de una sensibilidad muy alta.
5. Los emisores y receptores deben tener unos tiempos largos de vida útil, superiores a 105 horas.
6. Los emisores deben tener la potencia suficiente, dependiendo de las pérdidas de la fibra, que son consecuencia de las características de la fibra, longitud de la misma, enlace y aplicación.

- Fuentes o emisores ópticos.

Hay dos tipos de fuentes semiconductoras para aplicación en fibras ópticas como emisores de luz: LED y LASER

El diodo LED:

Debido a la gran dispersión espacial de la luz y a la distribución espectral tan amplia que presenta un diodo LED específico para aplicaciones ópticas, se utiliza para realizar transmisiones a distancias cortas y con bajos niveles de potencia óptica. Son relativamente baratos y poseen un tiempo de vida útil muy largo (10^7 horas).

Para aplicaciones en telecomunicaciones y por razones de velocidad y capacidad de transmisión, se desarrollaron los siguientes tipos de LED:

- LED de emisión superficial.
- LED emisor de orilla.

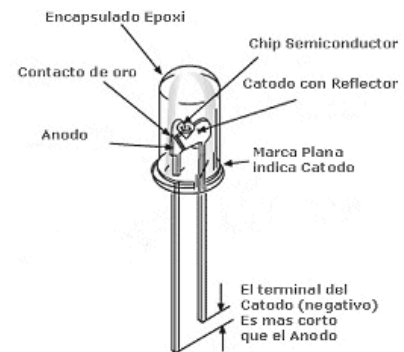


Figura 2.7. Partes constitutivas de un LED
© www.technocracia.com

El diodo LASER:

El LASER, (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), es básicamente un diodo semiconductor que cuando se polariza directamente emite una luz coherente, monocromática y muy estrecha en su ancho espectral, del orden de 1 nm, según dispositivo. Esta luz debido a su espectro tan estrecho, no se dispersa tanto como la luz producida por el diodo LED, por lo que se puede emplear eficientemente para transmisiones a mucha distancia y a frecuencias muy superiores a los 300 MHz. Por ejemplo, el Diodo LASER comercial HL6339G/42G (Opnext) produce una salida de 5 mW, a 633 nm, con una corriente de 55 mA y una tensión de 2,3 voltios. [23]

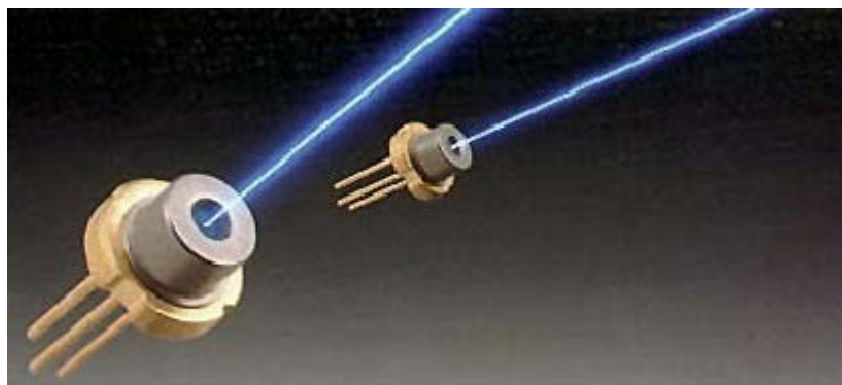


Figura 2.8. Diodo LASER
© www.technocracia.com

- Detectores o receptores ópticos

En sistema con fibra óptica se utilizan básicamente dos tipos de semiconductores detectores de luz: fototransistores y fotodiodos.

Fototransistores:

A pesar de poseer buena sensibilidad, no posibilitan altas velocidades de transmisión, lo que limita su espectro de aplicación. No obstante, gracias a su linealidad, son muy empleados en sensores. (Ver figura 2.9)



Figura 2.9. Tipos de fototransistores y símbolo
© www.electronica2000.net

Fotodiodos:

Estos dispositivos son muy rápidos, de alta sensibilidad y pequeñas dimensiones. La corriente eléctrica generada por ellos hace necesaria la amplificación pues es del orden de los nanoamperios.

Los fotodiodos utilizados en la actualidad son los siguientes: PIN y APD.

- Diodo PIN.

Este diodo está conformado por una capa intrínseca, casi pura, de material semiconductor, introducida entre la unión de dos capas de materiales semiconductores tipo n y p (ver figura 2.10). La luz entra al diodo por una ventana muy pequeña y es absorbida por el material intrínseco, el cual se excita para lograr que los electrones se muevan de la banda de valencia a la banda de conducción, generándose portadores de carga eléctrica que permiten que una corriente fluya a través del diodo. Los diodos PIN requieren bajas tensiones para su funcionamiento, pero deben utilizar buenos amplificadores. Presentan tiempos de vida relativamente altos, que podrían reducirse únicamente por factores externos y son los más indicados para el uso en la segunda y tercera ventana de transmisión (1.300 y 1.550 nm), según el material con que se construyan.

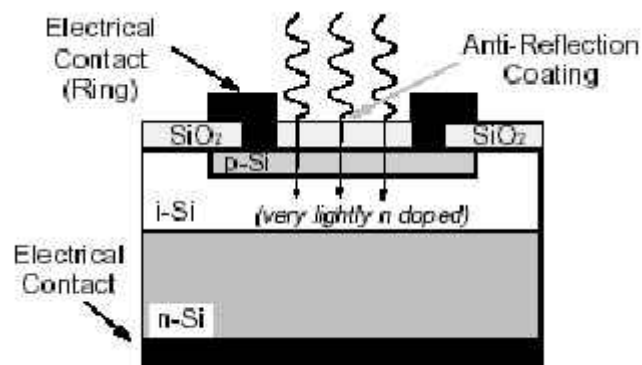


Figura 2.10. Esquema fotodiodo PIN
© gda.utp.edu.co



2.6 Sensores POF

Las características de la fibra óptica hacen que, además de utilizarse en la transmisión, sea posible la construcción de sensores a partir de POF. Esto es debido a que, además de su manejabilidad, robustez y bajo precio, presentan un pequeño tamaño que posibilita una gran sensibilidad en un espacio reducido en relación a otros medios de sensado. Además se ha demostrado su capacidad para trabajar con multitud de parámetros como temperatura, humedad, presión, presencia de componentes orgánicos e inorgánicos, viento, velocidad, índice de refracción... Debemos añadir que la utilización de esta tecnología elimina el riesgo de chispas eléctricas por lo que se hace especialmente indicada para ambientes explosivos (ATEX), como pudiera ser un depósito de combustible. [14]

A continuación se presentan algunos ejemplos de sensores basados en POF, tanto comerciales como en fase de estudio. Cabría añadir a esta lista la sonda de nuestro proyecto, configurada para que se modifiquen sus pérdidas de luz en función del nivel de líquido.

➤ **Sensores comerciales**

Se pueden encontrar un gran número de sensores que incorporan cables de fibra óptica plástica, no así que incorporen dicha fibra como material específico de sensado. La mayor parte de los sensores elaborados con fibra óptica actuales funcionan como detectores de presencia. Su principio de funcionamiento radica en la emisión de luz por un extremo de la fibra óptica, un reflector devuelve la mayor parte de esa potencia lumínica siempre y cuando la dirección no esté interrumpida por la presencia de un cuerpo [5]. En este ámbito podemos encontrar sensores fotoeléctricos y barreras fotoeléctricas. Sirvan como ejemplo los siguientes modelos:

Sensores fotoeléctricos

Transductores basados en la intensidad de luz que se refleja. Para el caso del RC-20, fabricado por Philtec (ver figura 2.11), se le dota de un par de detectores de fibra óptica en el extremo del cable. La luz reflejada en el objetivo sigue dos direcciones en su regreso, cuando un cálculo radiométrico proporciona una medida de distancia independiente de la reflectancia. Este efecto se conoce como reflectancia compensada. [24]



Figura 2.11. Sensor RC-20 para medida analógica
© www.a-tech.ca

Además se encuentra muy en boga la aplicación de este tipo de sensores, conforme a los reglamentos CE, relativos a la progresiva implantación de sistemas de protección para peatones en automóviles. Su funcionamiento consiste en que diversas zonas se encuentran a lo largo del sensor donde el núcleo de la fibra está expuesto. La evaluación de varias fibras y la apreciación del sentido de la flexión aportan la información sobre la localización y la amplitud de la deformación y, consecuentemente, sobre el objeto. Ver esquema de deformación en figura 2.12. Hasta ahora sólo se instalan en automóviles de alta gama. [15]



Figura 2.12. Esquema de funcionamiento del sistema de protección a peatones
© IFM Electronics: Opto Times, Novedades en Ciencia y Tecnología

Barreras fotoeléctricas

Principalmente utilizadas para la detección de etiquetas y códigos de barras, transparentes o en papel, y sobre los materiales más diversos. Útiles también para detectar piezas pequeñas y anchura de piezas. [18] En este tipo de sensores se encuadran multitud de aplicaciones, como las barreras fotoeléctricas unidireccionales. En esta tecnología construída mediante FOP podemos encontrar la familia de la fotocélula E3X de Omron, donde se encuadra el A41; sensor consistente en un cable de fibra óptica que actúa como cabeza sensora y un amplificador. [26]



Figura 2.13. Omron E3X-A41
© www.technikbrno.cz

➤ En fase de desarrollo

Dentro de este campo hemos localizado proyectos que proponen la aplicación de fibras ópticas de plástico como elementos de sensado en sistemas que permiten la medición del desplazamiento. Esta variable es fácilmente convertible a una medida de nivel de líquido mediante el uso de un elemento flotante, no necesario en nuestra sonda. A continuación introducimos los dos ejemplos más representativos:

Sensor de desplazamiento basado en fibras ópticas plásticas.

Se basa en la modulación de la intensidad de la luz. La luz incidente, emitida sobre una superficie reflectora por una fibra óptica, puede ser recolectada por la misma fibra óptica o por un paquete de fibras (ver figuras 2.14 y 2.15). Así pues, la potencia óptica detectada depende de la separación fibra-superficie y de los parámetros optogeométricos de la fibra. [16]

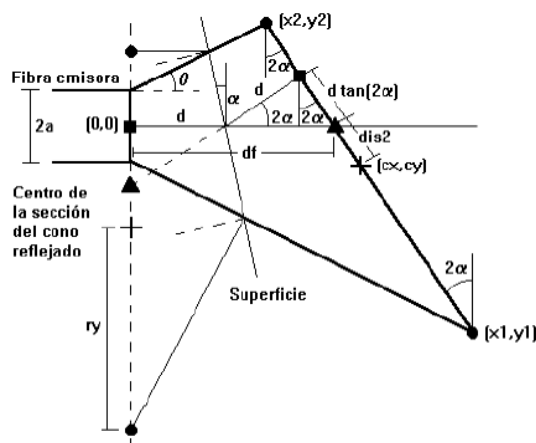


Figura 2.14.

Esquema de la distribución de la luz emitida por la fibra en incidencia oblicua sobre la superficie receptora.

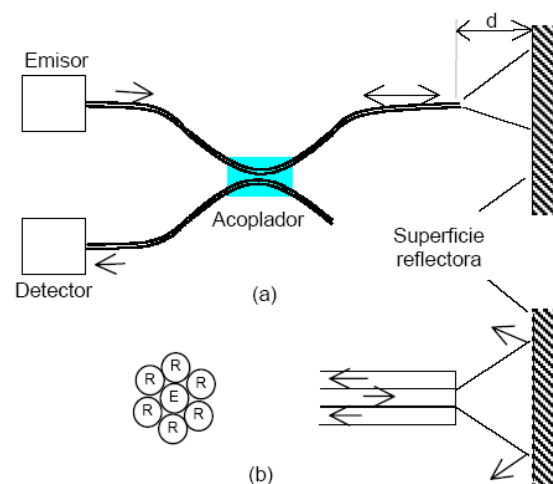


Figura 2.15.

Sensores de fibra óptica de desplazamiento.
(a) De una sola fibra
(b) Con un paquete de fibras"

Sensor de desplazamiento basado en redes de difracción utilizando fibras ópticas plásticas.

Idéntico principio de funcionamiento al anterior. El sensor, basado en intensidad, tiene un final de fibra óptica en ángulo donde se ubica una red de difracción (ver gráfico 2.16). El ángulo de pulido de la fibra (α) y el periodo de la red son adaptados con la finalidad de obtener únicamente dos órdenes difractados en la salida de la fibra-red, de forma que uno sirve de referencia y el otro va en función del desplazamiento, produciéndose la autocompensación y estabilidad del sensor de salida. Con el uso de un sensor LED se ha obtenido un rango de medida de 4 a 18 mm, con una resolución de $50\mu\text{m}$. [17]

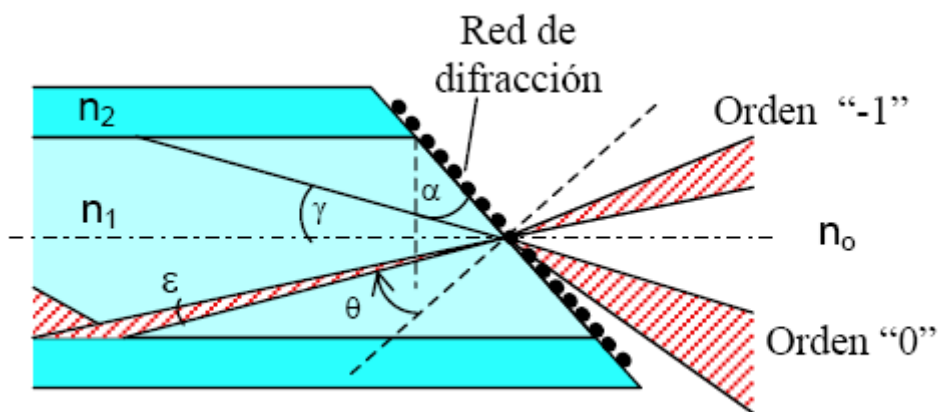


Figura 2.16.. Principio de funcionamiento del sensor de desplazamiento.
 © Grupo de Ingeniería Fotónica, Departamento TEISA Universidad de Cantabria.
 “Nuevo sensor de desplazamiento basado en redes de difracción utilizando fibras ópticas”

2.7 Fabricantes

Fabricantes actuales en el mercado.

- Conectores y sensores: Hewlett Packard, Sick, Baumer Electrics, ABB, Pepper & Fuchs, Harting, Fujikura, Ideal, Turk Banner [5]...
- Cable POF: Lapp Cable [5], Leoni-Prinz [1], Mitsubishi Rayon [6], Asahi Glass Co [7], Nexans [8], OFS [9].



Figura 2.17. Logotipos principales fabricantes



3. EL PARAMOTOR

A continuación se realiza una presentación general del equipo plataforma de nuestra aplicación. Veremos que la investigación en este campo es mínima ya que los paramotores se configuran a partir de piezas de otros equipos, básicamente los cortacésped. Se hará un recorrido de las peculiaridades y modelos de todas las gamas y modelos de competición, se ha buscado el asesoramiento por parte de paramotoristas expertos en un campo que nos resulta extraño. Asimismo estudiamos las posibilidades de integración del dispositivo final en la estructura que incorpora el paramotor buscando el máximo beneficio para el piloto, además de plantear posibles mejoras para posteriores estudios. Por último haremos mención a los dispositivos electrónicos comerciales que incorpora en la actualidad.

El paramotor es el nombre utilizado para definir el vuelo en parapente, propulsado mediante un conjunto motor+hélice. Permite despegar desde superficies planas, requiriéndose muy poco espacio. El despegue puede hacerse a pie, o bien utilizando un carrito con ruedas (*trike*). Según el equipo utilizado, se puede volar en monoplaza o en biplaza.

Su origen se remonta a principios de los años 80. Los motores utilizados mayoritariamente son motores de 2 tiempos, de entre 80cc y 350cc, que desarrollan una potencia de entre 14cv y 30cv. El peso del motor (+chasis, +hélice, +arnés) oscila entre los 18kg y 30kg, a los que hay que sumar el peso de la gasolina que se lleve. El consumo de los motores oscila entre los 3 y 5 litros/hora, con lo que la autonomía normal es de 1:30 a 4 horas de vuelo. Todo el equipo se puede transportar en el maletero de un coche, haciendo que éste sea el medio de volar (motorizado) más simple que exista.

El paramotor es considerado una adaptación del parapente. Los parapentes para volar necesitan una velocidad de viento que supere los 20 km/h dependiendo del tipo de vela. Esta velocidad se consigue gracias al viento o al viento que se genera al correr por una pendiente. En el paramotor esa velocidad de viento se genera gracias al empuje que proporciona el motor que llevamos a la espalda; en el momento que se supera la velocidad necesaria la vela despegue. Mientras que en el parapente se requiere de cierta altura para poder volar, con el paramotor se puede despegar prácticamente desde cualquier lugar llano.

La mayoría de los motores son de origen europeo y las marcas dedicadas a este deporte (H&E, Clemente...) los instalan en chasis con variaciones en el tipo de hélice y el tipo de anclaje del arnés. También es posible adaptar motores de *karting* obteniéndose muy buenos resultados. El parapente utilizado puede ser el mismo que se utiliza para vuelo libre (sin motor) aunque cada vez las fábricas apuntan a velas especiales para el vuelo motorizado, con mayores refuerzos e incluso con características diferentes, como es el caso de los parapentes con perfiles '*Reflex*'. La vela generalmente es de origen europeo, israelí o brasileño; si bien muchas marcas realizan la producción en Asia.

Existen varios tipos de vela según las características y habilidades del piloto (más o menos fáciles, más o menos rápidas) y siempre se debe utilizar una talla de vela adecuada al peso del piloto y/o acompañante más todo el equipo [30].



Figura 3.1. Volando en paramotor
© www.oftalmo.com

3.1 Estructura

En primer lugar procedemos a clasificar la gran variedad de modelos de paramotor existentes en el mercado atendiendo a su peso y por tanto a su potencia; o peso máximo del piloto que soportan. Por este criterio, distinguiremos tres familias:

- **Gama ligera.**

Como por ejemplo el modelo Rak 110 que vemos en la figura 3.2. Paramotores pequeños y más económicos, con menos de 23 kg de peso, si bien suelen pesar cerca de 15kg [35]. Indicados para pilotos de hasta 125 kg, con los motores más fiables y poco mantenimiento. Entre sus ventajas también se encuentra una maniobrabilidad excepcional cercana al vuelo libre, es decir, sin motor. Sus aros, por norma habitual, de menor envergadura y desmontables, permiten un fácil transporte del equipo; hélices de hasta 110 cm de diámetro [31]. Están especialmente diseñados para soportar esfuerzos mecánicos ya que son típicamente empleados en las escuelas de vuelo con paramotor. En esta gama, algunos sistemas permiten el apagado del motor en vuelo, para planear con ayuda de un parapente. El posterior arranque puede realizarse también en vuelo [34].



Figura 3.2. Modelo Rak 110
© www.clementeparamotor.com

La capacidad típica de los depósitos de combustible de estos paramotores es de unos 9 litros, lo que unido a su consumo, próximo a 2,5 litros de combustible por hora, le confieren una autonomía de más de tres horas de vuelo.

- **Gama media.**

Confieren un extra de seguridad y confort. Pensados para soportar mayor peso, hasta 180 kg, pueden ser configurados como biplaza y permiten ágiles maniobras de ascenso. [31] En esta gama se encuadra el modelo Mini4 de Clemente Paramotor que podemos ver en la figura 3.3. Cabe destacar los paramotores realizados en aluminio, y más aún en titanio, con un notable descenso en el peso del equipo [33]. Si bien éste se sitúa entorno a los 20 kg (sin carga y con el depósito vacío) [31].

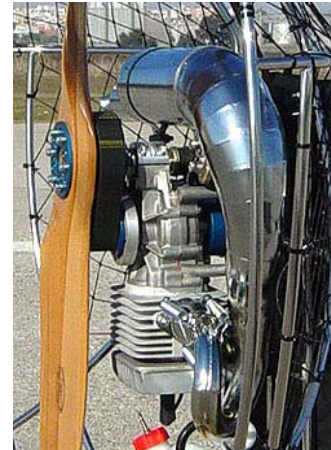


Figura 3.3. Modelo Mini4-125
© www.clementeparamotor.com

- **Gama pesada.**

Suelen estar equipados con arranque eléctrico como extra de confort. Debido a sus características, prestan un empuje que les hace ser típicamente configurados como biplaza (soportan hasta 200kg); piloto más pasajero (véase figura 2.4). Los motores alcanzan cilindradas de hasta 135cc. El peso de estos equipos supera los 25 kg [31].



Figura 3.4. Modelo Mini2-135
© www.clementeparamotor.com

En la actualidad, la totalidad de los modelos de paramotor utilizan como combustible gasolina súper con o sin plomo mezclada al 2-3% con aceite sintético [35], y son propulsados por sistema de hélice bipala, aunque algunos modelos incorporan tripala. El depósito de combustible consiste en una garrafa de plástico convencional (ver figura 3.5 A) [32]. Los últimos modelos incorporan el depósito de combustible integrado con la estructura del motor. En cuanto al material, se viene investigando la aplicación de fibra de carbono en sustitución de los plásticos de aplicación típica para reducir el peso. Si bien las pruebas están demostrando que este material resulta demasiado frágil [35]. El depósito de combustible se monta siempre debajo del asiento del conductor para evitar que el calor desprendido por el motor pueda afectarle.

Dependiendo del tipo de depósito utilizado en los paramotores, pueden incluir en su base una inclinación para que, una vez en vuelo, la superficie del combustible (horizontal) sea por tanto paralela al suelo y además a la base del paramotor. Esto se observa en los especialmente diseñados para equipar paramotores, ya que es frecuente el uso de depósitos de combustible de otras aplicaciones como pueden ser el *karting*.

En el caso concreto del depósito específico de paramotor utilizado por la empresa H&E Paramotores, la alimentación del motor se efectúa mediante vías a través del tapón del depósito, de forma análoga a como se permite el acceso de aire (ver figura 3.5 B). En otros depósitos, el acceso de una sonda intrusiva de combustible se vería facilitado por la existencia de dos tapones en lugar de uno sólo, generando alguna complicación por el sellado seguro de los agujeros a realizar en el tapón. Si bien, los agujeros practicados en el depósito para alimentar el motor y para respiración parecen un buen acceso para introducir la fibra de sensado.



Figura 3.5. Depósito de combustible H&E 16L.
Detalle de alimentación. Amarillo: combustible y filtro, negro: aire y válvula.

El arranque del paramotor se efectúa de modo manual, muy similar a como se arranca el motor de un cortacésped o un compresor portátil. Algunos equipos incorporan un arranque de pie que hace más cómoda su puesta en marcha, como se puede observar en la figura 3.6 [32]. Muy pocos equipos incorporan arranque electrónico, ya que, aunque se ahorra tiempo y esfuerzo en el suelo, el peso del equipo aumenta considerablemente en vuelo, siendo ésta una característica crítica al reducir las prestaciones y autonomía del paramotor.



Figura 3.6. Arranque tradicional y "de pie"
© Manual del Operario. H&E Paramotorres

Tabla resumen de características técnicas típicas según gama de paramotor [32]:

GAMAS DE PARAMOTORES						
GAMA	PESO	CILINDRADA	POTENCIA	PILOTO MAX.	PALA	CAPACIDAD DEPOSITO
Ligera	<23 kg	<100 cc	15 CV 9200 rpm	70 kg	90cm	5 L
Media	25 kg	125 cc	22 CV 10000 rpm	120 kg	115cm	9 – 13,5 L
Pesada	>26 kg	>130 cc	29 CV 10000 rpm	200 kg	125cm	13,5 L

Tabla 3.1. Características según gama de paramotor

A la vista de lo observado en las distintas familias de paramotores, podemos decir que las características de los paramotores vienen fijadas por el equipamiento con que se dota a un equipo en particular. Características como la cilindrada del motor, rpm, diámetro de pala...determinan el empuje del paramotor y, por tanto, el peso máximo del piloto que soportan. Otro equipamiento, como puede ser la existencia de arranque manual o electrónico, la ergonomía de la silla, reducción del diámetro de pala, cuenta revoluciones, modulabilidad de chasis y sistema motor...permiten una mayor confortabilidad tanto en vuelo como en el suelo. También se puede optar por reducir el peso total del equipo mediante el uso de chasis más ligeros, reducción del depósito de combustible; o proporcionar un extra de seguridad mediante el blindado de la pala de madera o carbono, sistemas de protección de la cabeza del piloto, o instalación de un *trike* de despegue y aterrizaje (ver figura 3.7). Además, todas las características de vuelo vienen influenciadas por la altitud a la que se desea volar, así como la pericia del piloto [32]. En cualquier caso se trata de equipos con equipamiento a completo deseo del usuario quien debe sopesar los pros y contras de cada extra para configurar un paramotor acorde a sus expectativas. Así, podemos equipar un paramotor de pequeña cilindrada con un gran depósito de combustible (13,5L) si lo que queremos es tener gran autonomía de vuelo a costa de agilidad sobre todo en el despegue. O bien, podemos equiparlo con un depósito de 5 litros, aligerando el peso del equipo en detrimento de horas de vuelo.



Figura 3.7. Trike paramotor
© www.ojovolador.com



3.2 Trayectoria habitual de vuelo

La duración del vuelo está determinada por la autonomía de nuestro equipo, por lo general entre una y tres horas. La velocidad de vuelo es de unos 40 km/h, a una altitud de hasta 500 metros y la trayectoria es recta por norma habitual. Además los giros suelen ser suaves por lo que el combustible apenas se desplaza. El empuje no es completamente horizontal, pero tampoco es necesario alterar la posición del paramotor ya que las hélices se construyen con un ángulo de inclinación, hasta 20°. Además, las vibraciones en vuelo son mínimas y pueden reducirse mediante la correcta calibración de la hélice.

3.3 Elementos electrónicos comerciales que puede incorporar

Como extra al equipo del paramotor podemos encontrar el **cuentarrevoluciones con medida de temperatura del motor** o medida del tiempo total de vuelo para tener en cuenta la autonomía de nuestro equipo (véase la figura 3.8). En cambio no permiten una medida directa del combustible restante. Estos equipos son completamente autónomos (alimentación por pilas) [33].



Figura 3.8. Cuentarrevoluciones con temperatura
© www.airfer.com

En esta gama se incluye el **Tiny Tach** (véase la figura 3.9) de Design Technology Inc. Incorpora un cronómetro, tacómetro, cuantarrevoluciones hasta 9900 rpm, actualización cada 2 segundos y batería de litio autorrecargable. El precio del fabricante ronda los 40\$ [8].



Figura 3.9. Módulo visualización Tiny Tach
© www.manddsmallengine.com

Con el desarrollo de los equipos informáticos portátiles, se ha logrado la aplicación de las ventajas de esta tecnología a los paramotores, como es el caso del Quest! XC, que combina en una única unidad:

1. Nivel de combustible y monitorización del motor.
2. Variómetro y altímetro.
3. Ordenador de vuelo y planificador de rutas.
4. Registro de datos.

Quest! XC permite visualizar todos los parámetros de vuelo en una única unidad, no mayor que un altímetro convencional, unida por un solo cable a una centralita de sensores. Sin la conexión a dicha centralita de sensores, puede también ser usado como un completo altímetro que registra el vuelo para analizarlo posteriormente en un PC. Dispone de entrada para GPS que combinado con el variómetro proporciona una información completa. La unidad de visualización (véase figura 3.10) mide tan solo 136 x 80mm y el peso del sistema completo, incluidos la centralita y los sensores es de aproximadamente 500g (sin contar la batería) [37].

El coste de este equipo ronda los 1100€, y su instalación es compleja debido a que es necesario configurar el equipo a las características del paramotor.



Figura 3.10. Quest! XC
© www.ojovolador.com

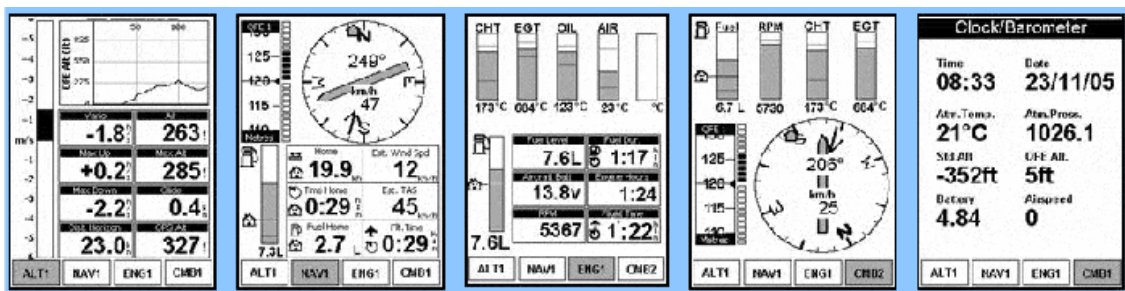


Figura 3.11. Pantallas de navegación Quest!XC
© www.nac-inter.com

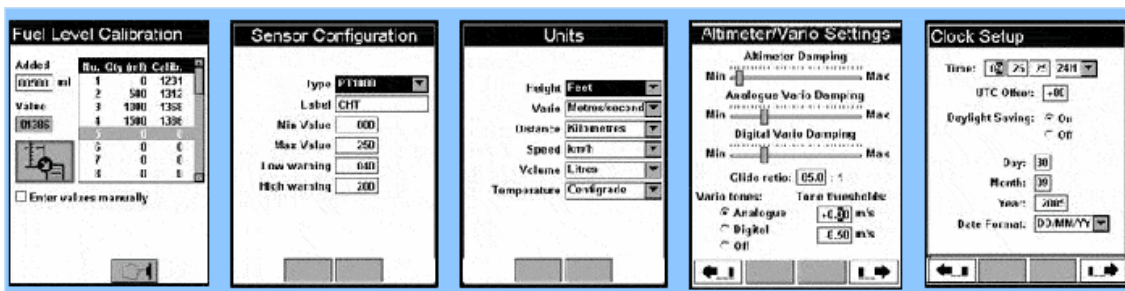


Figura 3.12. Pantallas de configuración Quest!XC
© www.nac-inter.com

En esta línea también podemos enmarcar el **IQ ONE** e **IQ ONE+** (figura 3.13) que introducen una tecnología de vario-digital de alta precisión con respuesta variable y excelente presencia de audio. Los instrumentos vienen en una nueva caja ABS titanio-metálica, con pantalla grande, agarre de "tacto suave", y botones grandes. El IQ One tiene memoria de vuelo hasta 40 vuelos y registra todos los valores máximos.



Figura 3.13. IQ One
© www.paramotor.home.pl



El IQ One+ tiene hasta 130 horas de registro de vuelos, y los datos de los vuelos se pueden descargar al PC utilizando el software Flychart, que también puede manejar los ajustes básicos del instrumento. Todas las funciones son programables y hay un puerto opcional para sonda de viento/velocidad [7]. Su precio es próximo a 250€. Aunque no proporciona una medida directa para el nivel de combustible, sí que permite su estimación a tenor del consumo y depósito de combustible del paramotor.

Existen muchos más artículos de este tipo en parapente y paramotor que integran múltiples funcionalidades, pero el precio de todos ellos es elevado. Además sólo el Quest! XC permite la visualización directa del nivel de combustible. Cabría destacar que todos ellos son de alimentación completamente autónoma, mediante el uso de pilas o baterías, siendo extras de un equipo básico de paramotor.



3.4 Medida del nivel de combustible y preferencias de los usuarios

Hasta la actualidad, el único dispositivo que permite la medida directa del combustible en un paramotor es el Quest XC. Su principal inconveniente reside en su precio pues el equipo completo ronda los 1100 euros. Su peso total es de 500 gramos sin contar la batería (alimentación autónoma). Si bien se trata de una completa centralita que integra muchas más funcionalidades que la visualización del combustible restante. Esta presentación se efectúa en litros restantes con un decimal además de ofrecer una representación gráfica de barras bastante intuitiva (la resolución de la misma es desconocida). No obstante, para funcionar correctamente, necesita de una configuración previa del depósito en que se introduce la capacidad máxima del mismo de una lista cargada en el aparato. Asimismo permite la configuración de una alarma que nos indique que sólo disponemos de un determinado nivel de combustible restante.

Hemos entrado en contacto con usuarios habituales de paramotor que nos han indicado sus preferencias para el desarrollo del dispositivo. En este sentido, abogan por una sujeción del display a la muñeca o las piernas por medio de velcro. Si bien, el sistema se mejoraría si no fuera necesario el uso de cables.

Como unidad de visualización eligen “litros”, sobre “tantos por cien” de combustible restante. Ya que esto, unido al dato de consumo por hora propio de cada modelo de paramotor, nos permite hacer un cálculo aproximado del tiempo de vuelo restante. El empleo de una barra indicadora es prescindible. Apuntan el interés de una alarma acústica de “medio depósito” y de “depósito en reserva”, debido a que la incidencia del sol en ocasiones hace imposible la visualización de una pantalla. Esto se haría posible gracias al uso por parte de los pilotos de un casco con dos auriculares muy extendido en el vuelo con paramotor. Este equipo está especialmente indicado para entornos con mucho ruido. Tal es el caso del casco NAC (véase figura 3.14).

Las soluciones que existían hasta ahora en la determinación del combustible restante eran muy rudimentarias. A través de paramotoristas expertos hemos conocido que estas medidas de nivel se efectuaban mediante el uso de un espejo que permitiera la visualización directa del nivel de combustible, fuera del campo visual del piloto debido al asiento. Además, también se podía emplear una botella de plástico intercalada con el manguito de alimentación y llena de combustible, de forma que siempre dispusiéramos, en el peor de los casos (depósito vacío) del volumen de combustible contenido en la botella.



Figura 3.14. Casco tipo NAC
© www.ojovolador.com



4. DEFINICIÓN DE LA APLICACIÓN

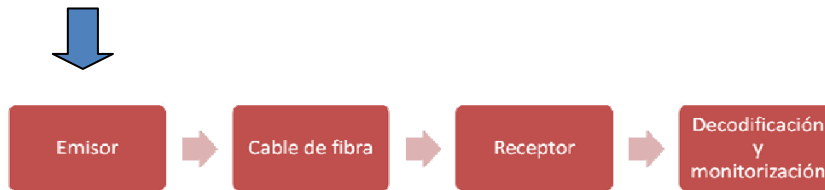
En este capítulo procedemos a la descripción individual de cada uno de los módulos que configuran el sensor de medida de combustible. Las ideas iniciales con que nace este proyecto son las siguientes:

- Sencillez constructiva. Que se manifieste en un descenso de los costes de fabricación.
- Ligereza. Tratándose de que el peso es una característica crítica del equipo sobre el que se va a equipar el sensor, resulta fundamental que éste sea reducido.

El sistema consta de un emisor, un cable de fibra óptica, un receptor y un bloque de visualización. El funcionamiento básico consiste en que el emisor produce una potencia de luz determinada. Dicha luz atraviesa la fibra, para cuya longitud las pérdidas deberían ser casi nulas. Se pela la cubierta de la fibra para que las condiciones externas puedan afectar a la salida de potencia, es decir, para que el líquido pueda cubrir zonas de la fibra dependiendo del nivel al que ascienda. De esta manera, y gracias al cambio en el coeficiente de refracción del material que rodea al núcleo-cubierta de la fibra, esto es, la diferencia aire-líquido, se producen unas pérdidas proporcionales a la cantidad de líquido que cubre la parte pelada de la fibra óptica. Posteriormente, sólo queda evaluar la llegada de potencia al otro extremo de la fibra (receptor) para valorar cuál es la cantidad de líquido alojado en el depósito. Por último representamos dicho nivel mediante LEDs.



4.1 Bloque Emisor



Como equipo emisor utilizaremos un dispositivo que genere la luz que nos servirá para realizar la medida. Se debe elegir un emisor que emita a una longitud de onda para la cual las pérdidas de la fibra óptica sean mínimas, por tanto para la fibra óptica de plástico (que luego describiremos) se trabaja con 650nm. En este caso se utiliza un emisor compacto con su electrónica de excitación incorporada y con acoplo directo a fibra óptica: el HFBR 1528.

Emisor: HFBR 1528

La serie de enlace versátil de Hewlett Packard, a la que pertenece el HFBR 1528 (ver figura 4.1), es una familia completa con componentes de enlace de fibra óptica para aplicaciones que requieren un bajo coste. Incluye transmisores, receptores, conectores y cables de fácil montaje y diseño. El diseño de enlaces ópticos se simplifica con los receptores compatibles con sistemas lógicos [39].

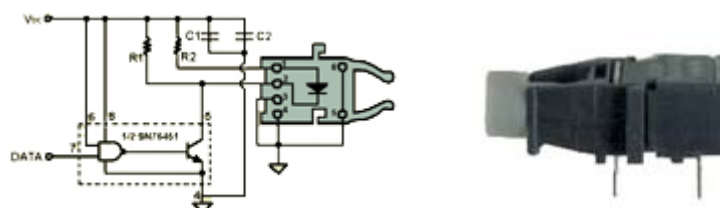


Figura 4.1. Esquema eléctrico y encapsulado emisor HFBR 1528
© www.diotronic.com



Diseñado para un acoplamiento eficaz de la potencia para el caso de emplear fibra óptica de plástico de 1mm de diámetro. La serie completa opera desde tensión continua hasta 10Mbd a distancias de hasta 50 metros con POF y hasta 500 metros con HCS (Hard Clad Silica Fiber). No se prescriben distancias mínimas de conexión cuando se emplean los circuitos recomendados, que además simplifican notablemente el diseño [40].

Los terminales se conectan de la siguiente manera (ver apartado 4.1.1. Alimentación):

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">- DATA. A GND- VCC. A +6 V. |
|--|

4.2 Alimentación

La alimentación habitual del emisor HFBR 1528 es de 5 voltios, pero debido a consideraciones de peso y tamaño, aparte de disponibilidad de pilas comerciales, nos vemos obligados a alimentar a 6 voltios en la aplicación final para obtener un sistema de alimentación autónomo. De esta forma sufrimos una pérdida asumible de rendimiento. El motivo es que, siguiendo los preceptos básicos del proyecto de sencillez constructiva y ligereza, para nuestro caso interesa una pila de pequeño tamaño, como puede ser cualquiera de la clase CR (pilas de moneda, ver figura 4.2), todas de igual tensión y dimensiones: 1.6-5mm H, 16-25mm Ø. Para conseguir la tensión, de alimentación dispondremos dos pilas 2032 en serie, con una tensión nominal de 3 voltios por unidad. [19]

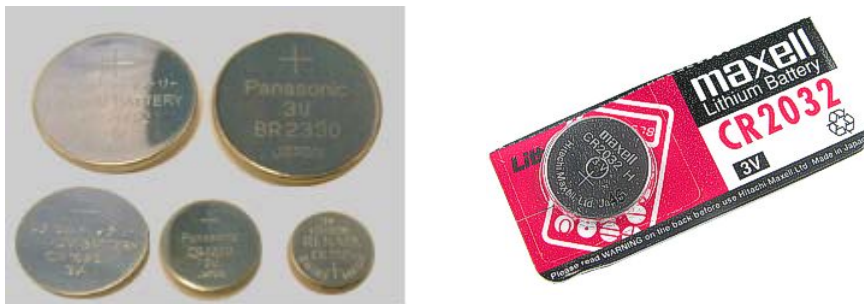


Figura 4.2. Distintos modelos de baterías tipo CR y Maxrell CR 2032
© www.micropic.com

La implementación de la serie de ambas baterías es posible mediante el uso de un solo zócalo para 2032, denominado ZOC 2032 (ver figura 4.3), el cual aloja las pilas y asegura el contacto entre polos opuestos de las mismas de forma compacta.



Figura 4.3. ZOC 2032
© www.micropic.com

4.3 Bloque “cable de fibra”



El cable de fibra constituye, por una parte, la cabeza sensora del sistema de medición, y a su vez, transmite la luz desde el emisor hasta el receptor. Se trata de un cable FOP de 1000 μm : HFBR RUS 500.

Cable de fibra HFBR-RUS 500:

En su versión de bajo coste, es decir, con una atenuación típica de 0,22 dB/ms es empleado en las aplicaciones más habituales, que pasan por conexiones de datos industriales y automatización de procesos, conexión interna de sistemas de telecomunicaciones, conectorización de PC a periféricos, LAN, video digital, instrumentación médica, aislamiento de alta tensión...

Esta serie de cable se construye de una fibra monomodo de índice escalonado, protegido por una cubierta de polietileno negro. Compatible con la serie versátil Agilent. Ver figuras 4.4 y 4.5: serie y caracterización de atenuación por longitud de onda:



Figura 4.4.
© HFBR-RUS 500 hoja de características

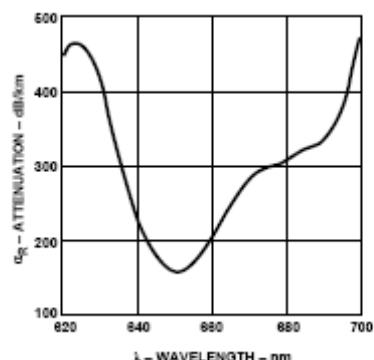


Figura 4.5. Atenuación típica fibra HFBR-RUS 500
© HFBR-RUS 500 hoja de características



A continuación se hace mención a los puntos más característicos de la sonda introducida en el sistema final para trasladar las pérdidas originadas por la altura del nivel de líquido al sistema:

1. Sonda con curvatura del tipo galga extensiométrica. Mayor diferenciación entre niveles de líquido sobre todos los tipos estudiados.
2. Número de curvas igual al de niveles a determinar. Cada curva produce unas pérdidas fijas en la llegada de potencia óptica al final de la fibra. Tanto es así que la fibra puede llegar a saturar sin ni siquiera haber sido sumergida. Por eso debemos minimizar el número de curvas.
3. Las curvas se practican a la altura que alcanza el nivel de líquido en cada momento. El hecho de asignar una curva a cada nivel nos ayudará a determinar el mismo de forma inequívoca.
4. Sonda semipelada o pelada por tramos. La curvatura produce que la mayoría de las pérdidas se generen en la zona sometida a torsión, más aún si pelamos su cubierta. Ésa debe ser precisamente la parte de fibra expuesta a los agentes externos (presencia o no de líquido), y por tanto pelada, para que el efecto sea el mayor posible sobre la potencia óptica de llegada.
5. Galga a través del tapón de llenado. Las curvas practicadas impiden que la sonda pueda ser introducida al depósito por algún orificio (como el de entrada de aire), teniendo que proceder a través del tapón de llenado.
6. Sonda adherida a un par de tubos metálicos. Permiten la mayor superficie de cable expuesta al líquido de todos los prototipos estudiados, además de dotar de solidez mecánica.

Para ampliar la información acerca de la sonda consultar:
5. Prototipos de Sondas Ópticas y Caracterización

Todas estas particularidades pueden observarse en la figura 4.6., que corresponde a un prototipo de galga semipelada.

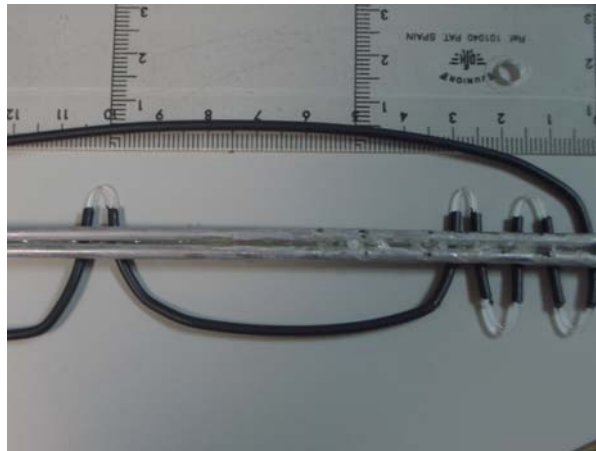
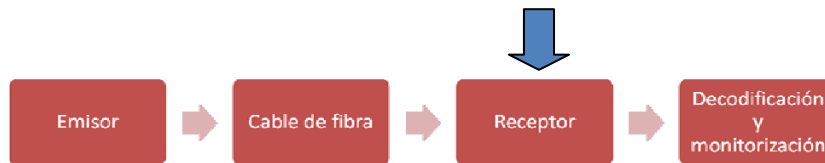


Figura 4.6. Galga pelada por tramos III

La conexión de la sonda se efectúa, al emisor mediante su conector particular y se monta directamente sobre el encapsulado del receptor IF-D91, presentado a continuación en 4.3. *Bloque Receptor*

4.4 Bloque “receptor”



Debemos evaluar la cantidad de luz que atraviesa la fibra y accede al sistema de interpretación. Dicha cantidad va a determinar el nivel de líquido que aloja el depósito. Con este motivo nos disponemos a elegir un componente que convierta dicha potencia luminosa en otra magnitud más fácilmente manejable e interpretable mediante una posterior lógica electrónica, por lo que emplearemos un fotodiodo.

El modelo buscado, lejos de poder ser empleado en especificaciones muy particulares, debe ser un fotodiodo de bajo coste (acorde con los preceptos del proyecto). Esto lo encontramos en los dispositivos de estas características, masivamente empleados en aplicaciones ópticas, como es el caso del ID-F91, cuyo encapsulado facilita su manipulación y ensamblado flexible. Empleado con la fibra estándar de 1mm, objeto del proyecto, este dispositivo nos va a aportar tiempos muy cortos de respuesta en un entorno de diseño no-óptico. Esta particularidad lo hace especialmente interesante dada la facilidad de interconexión dado que usamos fibras ópticas de plástico, no siendo necesarios complejos procedimientos de conectorización.

IF-D91:

Fotodiodo de alta velocidad encapsulado siguiendo el precepto “sin conector” para fibras ópticas de plástico (ver figura 4.7). Su respuesta abarca desde los 400 nm hasta los 1100 nm, lo que lo convierte en un dispositivo adecuado para la mayoría de aplicaciones prácticas con láser, en un rango desde el visible hasta cerca del infrarrojo.

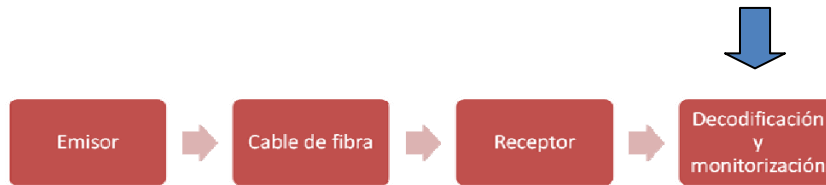


Figura 4.7. Fotodiodo IF-D91
© IF-D91 hoja de características



Elegimos una resistencia de carga para el que nos permita obtener valores significativos de tensión a la salida del fotodiodo, como por ejemplo de valor 10k. Si además esta resistencia la hacemos variable, podemos modificar la cantidad total de luz que se inyecta en el circuito y por tanto, la cantidad de pérdidas. Esta tensión también es dependiente de su alimentación y de la luz que incide en su lente procedente de la fibra óptica. Para que las condiciones iniciales en todo momento puedan reproducir las efectuadas en laboratorio para calibrar el sistema se utiliza una resistencia variable. De esta manera, en el momento de empezar a hacer uso del mismo, el usuario puede eliminar la influencia en el resultado de la medición de unas condiciones iniciales que podían diferir de las encontradas al calibrar el dispositivo en el laboratorio, ya sea por la modificación en la posición del cable de fibra, en el fotodiodo...que afectan directamente a la salida final de tensión.

4.5 Bloque de “decodificación y de monitorización”



El último bloque del sistema interpreta los datos extraídos por el receptor y los presenta para que sean accesibles al usuario. Siguiendo una vez más los preceptos de reducción de precio del sistema final escogemos dispositivos estándar.

➤ **Decodificación**

La señal que nos llega del fotodiodo consiste en un valor de corriente que convertimos en tensión con el uso de una resistencia de carga. Dicha tensión guarda una relación directa con la cantidad de combustible que el depósito aloja en cada momento, por lo que sólo necesitamos comparar dicha tensión con unos valores predeterminados para concluir cuál es el volumen de combustible restante en el depósito, y que vamos a representar mediante un código de nivel.

La decodificación hace referencia a la lógica empleada para convertir la información aportada por el fotodiodo, y convertirla para que sea interpretable por el usuario. Dicho proceso se va a llevar a cabo mediante un número de amplificadores operacionales LM-324, en configuración comparador, igual al número de niveles que tratamos de distinguir: 6 niveles. La salida de estos comparadores enciende el LED correspondiente al estado del depósito.

LM-324:

Amplificador operacional de baja potencia. Cada integrado (figura 4.8) acoge cuatro amplificadores de fuerte ganancia, compensados internamente en frecuencia. Bajo una única alimentación, es útil para un amplio rango de tensiones: desde -0.3 hasta 32 voltios positivos. Escogemos este integrado además de por su popularidad y bajo coste, principalmente porque permite alimentarse antisimétricamente, una característica no demasiado frecuente en amplificadores operacionales de bajo coste.



Figura 4.8. Chip LM 324
© www.solarbotics.com

No obstante, el dispositivo presenta un problema consistente en que su tensión de salida de saturación queda muy lejos de su tensión de alimentación (aproximadamente al 70%), hecho que podía suponer un inconveniente. Dado que las prestaciones de este chip resultan muy interesantes para la aplicación nos vemos obligados a reconfigurar otras características del sistema y conservar el uso del LM-324.

Los valores de referencia a los que se conectan las patillas de entrada de los operacionales se obtienen mediante una red de resistencias diseñada para obtener todos los niveles de tensión necesarios en la decodificación (convertidor tipo flash) que se representa en la siguiente imagen (figura 4.9).

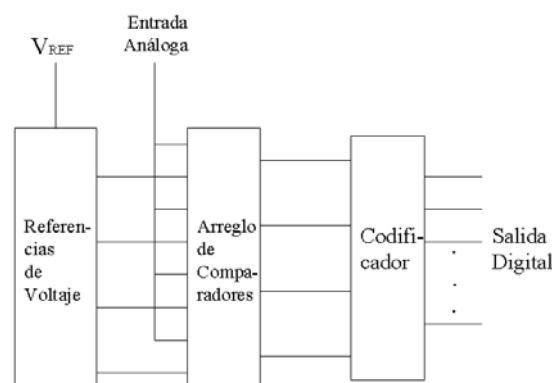


Figura 4.9. Esquema genérico de decodificación usando un decodificador tipo flash

Dado que los valores de tensión con que debemos comparar responden únicamente a la respuesta que presenta la sonda a las pérdidas de potencia de luz, siendo estos valores próximos en algunos casos, nos vemos obligados a emplear resistencias que nos ofrezcan baja tolerancia. No obstante, el uso de potenciómetros en lugar de estas resistencias nos resulta más cómodo y versátil, permitiendo una recalibración más exhaustiva que la necesaria de arranque para eliminar la posición. Además, nos permitirá obtener el valor exacto de resistencia requerido por el cálculo derivado de las tensiones de referencia. Para que la resolución no se vea afectada, emplearemos potenciómetros de 10k para los valores de resistencia por debajo de esa cifra. Para el resto potenciómetros de 100k. En el caso de que la resistencia supere este valor, se dispondrá una resistencia de baja tolerancia en serie con un potenciómetro de 100k para obtener el valor perseguido. Ver esquema en la figura 4.10.

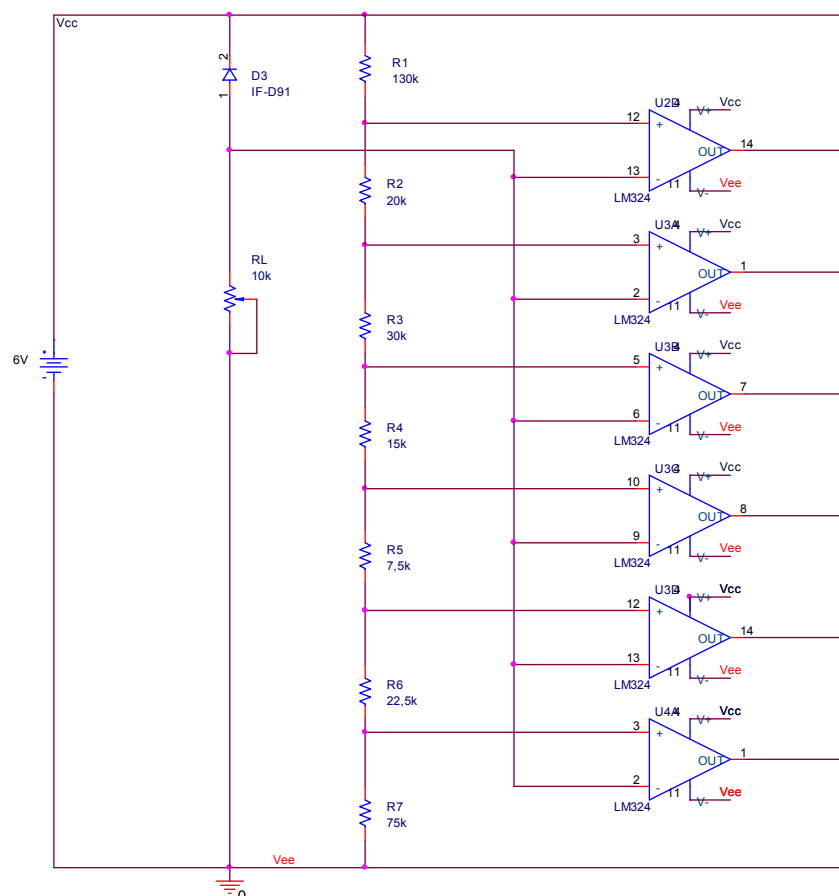


Figura 4.10. Alimentación + emisión de luz + decodificación



➤ Monitorización

La última parte del dispositivo consiste en el sistema de monitorización, que nos va a permitir observar de una manera sintética los resultados que arroja el sistema de medida de combustible. El ideal buscado es que dicha monitorización sea interpretable de un solo vistazo, para que resulte cómodo para el piloto de paramotor comprobar el estado del depósito. Esto tratamos de conseguirlo mediante el uso de una barra de LED's. Para simplificar su interpretación se hace uso de varios colores que por sí mismos trasladan una idea intuitiva del nivel de combustible restante:

1. Primer LED verde: quedan más de 6 litros de combustible.
2. Segundo LED verde: quedan de 2 a 6 litros de combustible.
3. Primer LED amarillo: queda de 1.5 a 2 litros de combustible.
4. Segundo LED amarillo: queda de 1 a 1.5 litros de combustible.
5. Primer LED rojo: queda de 0.5 a 1 litro de combustible.
6. Segundo LED rojo: queda menos de medio litro de combustible

No obstante, la interpretación de esta monitorización puede simplificarse más aún mediante la inclusión en el encapsulado final del sistema de una indicación o leyenda que recuerde el nivel en que se encuentra el depósito en función del LED correspondiente que en cada momento se encuentre encendido.

Diodos LED (*Light Emitting Diode*). Serie HLMP:

Esta serie de diodos pone a nuestra disposición cuatro tonalidades distintas con unas prestaciones semejantes. Se trata de diodos LED convencionales (propósito general) con una corriente de funcionamiento y una composición dependiente del color en cada caso (ver figura 4.11). Además ofrecen amplios ángulos de visualización, característica importante para nuestra aplicación en concreto, ya que resulta imprescindible para garantizar la correcta visualización por el usuario.

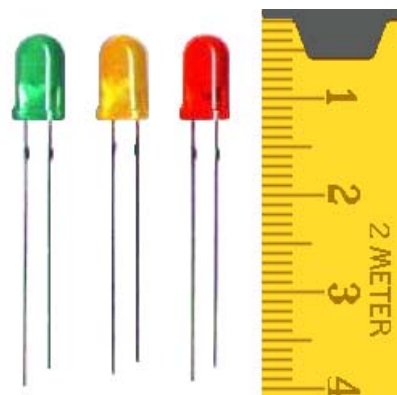


Figura 4.11. Diodos HLMP (estándar)
© Serie HLMP hoja de características

La barra de LEDs, además de representar la información acerca del nivel de combustible, nos sirve para efectuar la calibración de puesta en marcha del sistema. Con el depósito lleno, por ejemplo, deberemos calibrar el potenciómetro de carga del fotodiodo hasta que el último LED verde se apague. En ese momento el sistema, a pesar de encontrarse en unas condiciones extrañas a las que se trataban de reproducir en laboratorio, es independiente de las pérdidas derivadas de la posición del cable de fibra.

Nota: El sistema es calibrable para cualquier nivel de líquido. Para ello, solamente hay que reproducir el volumen que introducimos en el depósito con la barra de LEDs indicadora. A

Asimismo, se introduce un LED de funcionamiento y una resistencia en serie dimensionada para que el LED pierda luminosidad si se produce un descenso en la tensión de alimentación: 3k8. Esta es la única ocasión en que, correctamente calibrado, va a existir una diferencia entre el volumen alojado y el nivel representado. Esquema del sistema completo en figura 4.12:

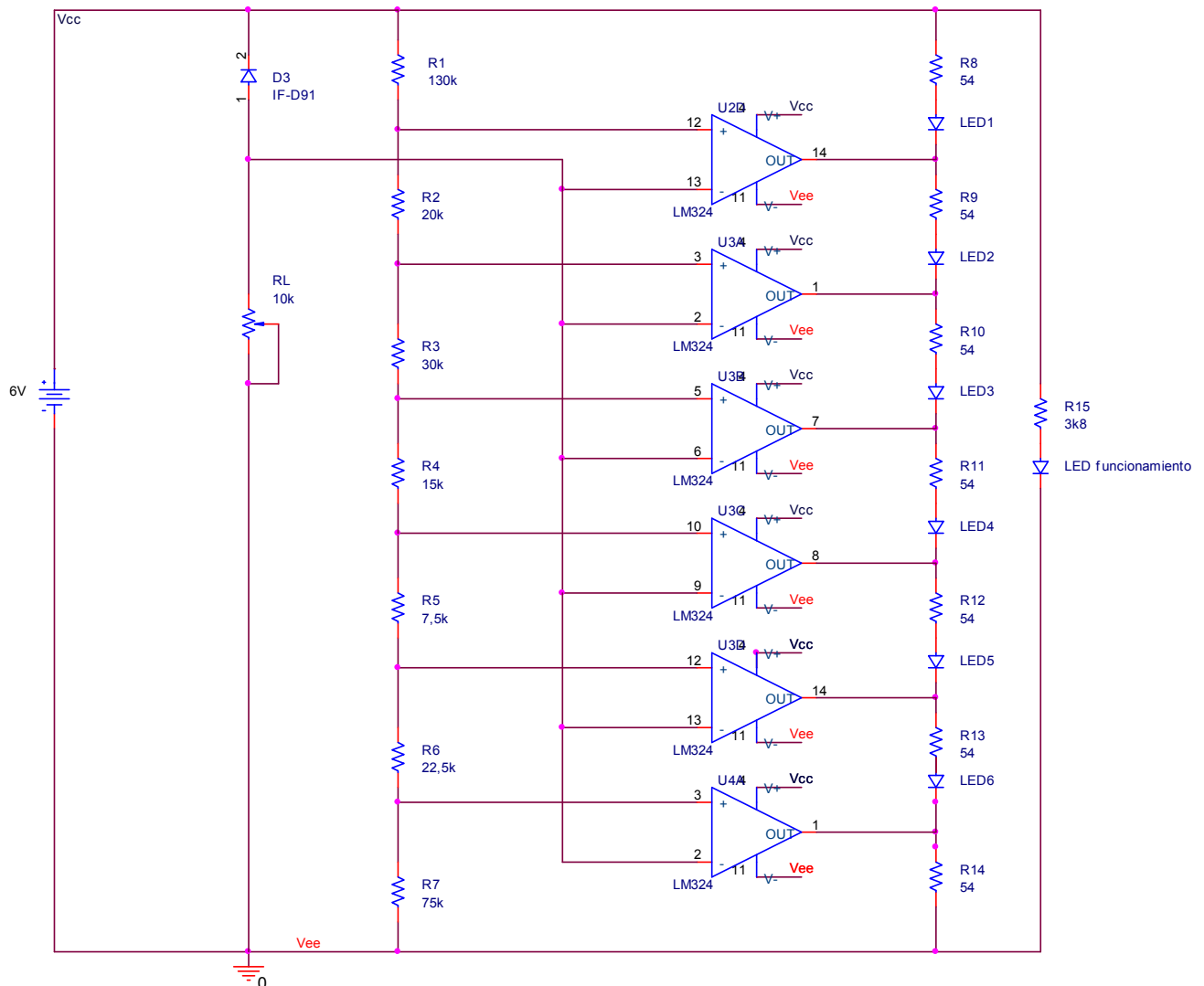


Figura 4.12. Sistema completo



5. PROTOTIPOS DE SONDAS OPTICAS Y CARACTERIZACION

A continuación se presenta el histórico de las sondas empleadas en la búsqueda de la cabeza sensora idónea para las necesidades del paramotor. Asimismo, se muestra el método de construcción de la cabeza sensora y los resultados de las pruebas y calibraciones obtenidas en laboratorio desde los primeros prototipos hasta el empleo de diferentes longitudes de onda, modificación del acceso de la fibra al tanque, forma y configuración de la cabeza sensora, soportes...



5.1 Principio de funcionamiento

Para observar variaciones importantes en las potencias de salida llegadas al receptor, trataremos de efectuar modificaciones sobre la sonda básica recta en base a los estudios que ya existen y que relacionan la curvatura que se practica en el cable de fibra con las pérdidas de potencia luminosa que en ella acontecen. Estas pérdidas son función del radio de curvatura y del tipo de fibra. En general, las pérdidas de curvatura tienen dos términos: pérdidas de transición y pérdidas puras de curvatura. [41]

Para el caso de la fibra FOP, su estudio puede ser abordado con ayuda de la Teoría de Rayos, debido a que contienen una gran cantidad de modos propagados. Esto nos permite disponer de expresiones simples que pueden caracterizar las pérdidas de curvatura. A continuación el estudio será realizado para una fibra multimodo de salto de índice y de gran diámetro.

En estas fibras, las pérdidas significativas tienden a ocurrir para un radio de curvatura crítico R_c , que puede estimarse de acuerdo a la siguiente relación: [42]

$$R_c = \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}}$$

Donde n_1 y n_2 son los índices del núcleo y la cubierta respectivamente y λ longitud de onda de la luz en el vacío.

Cuando el radio de curvatura R no es próximo a R_c , las pérdidas transitorias en la entrada de la zona curvada de una fibra multimodo, debido al filtrado espacial, se expresan mediante la expresión:

$$\alpha(dB) = 10 \log \left[\frac{R}{R - R_c} \right]$$

Las pérdidas totales de radiación, causadas por una vuelta completa en una fibra FOP típica de salto de índice de 1mm de diámetro, en función del radio de curvatura son de 4,5dB para un radio $R=5$ mm. [43 y 41]



5.2 Configuraciones básicas de prototipos de sondas y caracterizaciones

A partir de lo anteriormente presentado, construiremos tres formatos de sonda dependiendo de la curvatura que practicamos:

- Lisa. La sonda lisa consiste en una fibra plástica pelada sin curvatura alguna conducida al fondo del depósito mediante el alambre metálico.
- Hélice. Consiste en arrollar la sonda inicialmente en configuración lisa alrededor del alambre. De esta forma conseguimos mayor longitud de cable pelado, además de practicar una pequeña curvatura que multiplique las pérdidas y con ambas la sensibilidad de la cabeza sensora.
- Galga. En esta configuración tratamos de reproducir la geometría de las galgas extensiométricas. Así, curvamos los extremos para disponer segmentos aproximadamente horizontales. La mayoría de las pérdidas, como ya hemos visto, se producen en las partes dobladas.

a) Cable para hélice

Longitud total del cable= X cm

- Comienzo: Empalme dorado y 53 cm sin pelar, hasta zona sensible; donde puede alcanzar el nivel de combustible de nuestro depósito.
- Parte media: Y cm cable FOP pelado.
- Final: 54 cm sin pelar. Conexión con fibra desnuda y capuchón en medidor.

Practicamos el paso mínimo de torsión de forma uniforme sobre la fibra que nos permita reproducir una hélice sin partir el cable.

b) Cable para galga

Longitud total del cable= Z cm

- Comienzo: Empalme dorado y 53 cm sin pelar.
- Parte media: W cm cable FOP pelado.
- Final: 54 cm sin pelar. Conexión con fibra desnuda y capuchón en medidor.

5.3 Características del depósito y la medida

En este apartado, pretendemos ofrecer una descripción del depósito y, como consecuencia de éste, de las características de las pruebas a efectuar para caracterizar la sonda que utilizaremos en el sistema final.

➤ El depósito

Se nos hace entrega por parte del equipo de H&E Paramotor de un depósito de combustible de dimensiones estándar y capacidad 12 litros. Observamos que el depósito no puede llenarse por completo pues está dañado en la parte frontal. No obstante, según las especificaciones de paramotoristas expertos hemos visto cómo las señales prioritarias en la determinación del nivel de combustible deben aparecer una vez se ha consumido la mitad del total de combustible, por lo que no poder llenarlo no resulta inconveniente.



Figura 5.1. Detalle tomas depósito de combustible



➤ La medida

La parte más novedosa de este proyecto, consiste en fabricar una sonda que responda a nuestras necesidades de respuesta al nivel de combustible. Esta tarea implica la investigación de una cabeza sensora que permita distinguir volúmenes de líquido. Las pruebas que se han efectuado nos han servido para ir decidiendo las características a partir de unos prototipos iniciales, dado que su construcción física va a determinar su fisionomía, sensibilidad y, por tanto, su validez como objeto de nuestra aplicación. La ampliación de información de este punto se realiza a continuación.

Las pruebas realizadas en laboratorio son las siguientes:

- Medidas en prototipos de sondas sobre alambre. (5.4)
 - Medidas sobre aire y agua de todas las configuraciones. (5.4.1)
 - Medidas modificando longitud de onda. (5.4.2)
- Galga sobre superficie plana. (5.5)
 - Galga completamente pelada (5.5.1)
 - Galga pelada por tramos. (5.5.2)
- Hélice a través de la válvula. (5.6)
- Medidas en galga sobre tubos metálicos. (5.7)
 - Medidas en galga completamente pelada (5.7.1)
 - Medidas en galga pelada por tramos (5.7.2)

5.4 Medidas en prototipos de sondas sobre alambre

5.4.1 Medidas sobre aire y agua de todas las configuraciones de la sonda

➤ Primera caracterización

Empleamos sondas sin tubo de protección a través del agujero de salida de aire del depósito. Esto hace obligatorio que el sensor sea especialmente delgado, provocando la fractura de algunos prototipos. En esta toma de contacto con el método de medida pretendemos fijar una base sobre la que construir la sonda del sistema. Por ello las configuraciones son muy simples y reproducen las formas de otros sensores masivamente utilizados en electrónica.

Vamos a efectuar pruebas con las sondas definidas hasta el momento, pero con particularizaciones dependientes de cada caso. Los resultados se exponen en la tabla 5.1:

(Todos los cabos de las fibras debidamente pulidos según procedimiento del fabricante: HP)

Aire (dBm)	
Liso	-14.00
Hélice	-32.16
Galga	-48.43

Tabla 5.1. Potencia de llegada según tipo de sonda con 0 L

Medidas sobre agua (dBm)													
Vol	0L	0.5L	1L	1.5L	2L	2.5L	3L	3.5L	4L	4.5L	5L	5.5L	6L
Liso	-15.84	-16.31	-16.33	-16.33	-16.33		-16.31		-16.31		-16.31		-16.31
Hélice	-32.17	-33.89	-34.87	-35.12	-35.46	-35.62	-35.66	-35.91	-36.13	-36.17	-36.15	-36.13	-36.11
Galga	-48.43	-48.54	-48.48	-48.65	-48.91	-49.10	-49.16	-49.19	-49.34	-49.35	-49.35	-49.46	-49.52

Tabla 5.2. Calibración potencia de llegada según tipo de sonda



Figura 5.2. Detalle sonda cable liso



Figura 5.3. Detalle sonda hélice sobre alambre

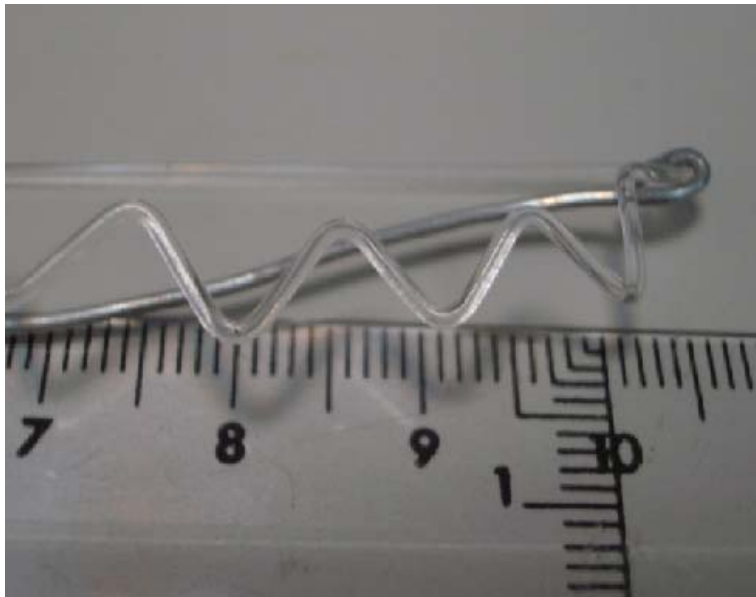


Figura 5.4. Detalle sonda galga sobre alambre

Conclusiones:

- I) Se comprueba que el efecto de que la fibra se moje en el llenado por encima del nivel del líquido distorsiona la medida. Para evitarlo se cubre con tubo de plástico genérico (negro).
- II) Al principio, para el caso del cable liso, el llenado de agua cubre la parte en que la fibra gira, por eso el efecto sobre la potencia es mayor. La variación sobre la potencia es paulatina a medida que llega líquido al depósito en el momento de añadir. Esto nos hace ver que resulta necesario para un correcto funcionamiento que se practique algún tipo de torsión en la fibra.
- III) A la vista de lo experimentado con el cable liso, esta configuración no parece resultar útil dado que las variaciones de la potencia de llegada son prácticamente despreciables. Así que se hace imprescindible realizar alguna torsión, con lo que en posteriores caracterizaciones prescindiremos de ella.



- IV) Como consecuencia de la torsión a la que se somete al cable liso, la potencia que llega al otro lado de la fibra en ausencia de líquido (0L) es inferior a la determinada en las condiciones iniciales al aire, es decir, aumentan las pérdidas de luz propagadas en su interior.
- V) Un exceso de deformación, aparte de poder provocar la fractura de la fibra, hace dispararse las pérdidas saturando la fibra óptica e impidiendo la variación por llegada de la luz. No obstante, si no se practica la deformación suficiente, la sonda adquiere las propiedades de la fibra lisa, ofreciendo una salida de pérdidas de luz casi constante.

Nota: Las medidas de potencia de llegada no son estables para el caso del cable con forma de galga. La aproximación consiste en tomar el máximo valor observado.



➤ Segunda caracterización.

En la primera caracterización observamos un efecto negativo como consecuencia de que la fibra hubiese resultado mojada al producirse los sucesivos llenados del depósito. Ahora, haremos uso de un tubo de plástico que proteja la sonda de resultar mojada.

Hélice y galga sobre agua a 660 nm (dBm)													
Vol	0L	0.5L	1L	1.5L	2L	2.5L	3L	3.5L	4L	4.5L	5L	5.5L	6L
Hélice	-24.50	-27.73	-28.74	-29.34	-30.04	-30.45	-30.60	-30.63	-30.88	-31.05	-31.05	-31.06	-31.06
Galga	-52.53	-54.48	-55.50	-56.01	-56.64	-57.12	-57.50	No hay datos					

Tabla 5.3. Nuevas medidas para calibrado (hélice y galga) a través de tubo

Conclusiones:

- I) Como se extrae de la tabla 5.3, el hecho de que la medida “sature” a partir de 4.5 L responde a que la parte con mayor sensibilidad de la sonda (parte torcida, hélice) ha sido rebasada por el nivel de líquido y por tanto responde como lo haría el cable de fibra liso, es decir, sin apenas pérdidas. Esto se debe a que el tubo de plástico negro que aloja la sonda y suministrado con el depósito que empleamos no es completamente recto, sino que tiene una cierta curvatura. Así, las primeras tomas de medidas se realizan sobre más longitud de la cabeza sensora que las siguientes. Este efecto se manifiesta sobre las dos variantes y se observa con mayor claridad a medida que avanzamos en el llenado del depósito, dado que las variaciones de la potencia de llegada no son constantes. Además, se observa que las mayores pérdidas se producen en los primeros intervalos de llenado, donde la sonda muestra su mayor sensibilidad.
- II) A partir de 3L, para el caso de esta galga, la potencia de llegada es tan baja que el sensor no la registra, por eso no existen datos



El principio físico que responde a nuestras observaciones es que cada modo de luz inicialmente excitado acarrea la misma cantidad de potencia (modo de distribución uniforme, UMD). En su recorrido por la fibra los modos individuales resultan atenuados. Esto se debe a que los modos de órdenes superiores viajan más lejos en la fibra que los modos de órdenes inferiores. Por tanto, los modos de mayor orden son objeto de las mayores atenuaciones. Además, tiene lugar un intercambio de energía entre los modos individuales, que afecta al modo de distribución uniforme. Este acoplamiento de modos es consecuencia de la falta de homogeneidad en el material del núcleo, así como de fluctuaciones en su diámetro generadas en el proceso de fabricación de la fibra. [44]

Esta explicación encuentra su complemento en los posibles diminutos daños que haya podido sufrir el núcleo de la fibra a la hora de pelarla para configurar la sonda.



5.4.2 Medidas modificando la longitud de onda

➤ Primera caracterización

Mediante la modificación de la longitud de onda, perseguimos trabajar con el máximo rendimiento del fotodiodo. Lo cual se traduce en una mayor potencia de luz a la salida y, por tanto, unos intervalos de luz mucho más diferenciados entre un nivel de llenado y su consecutivo

A continuación efectuaremos una nueva calibración mediante la inclusión de dos cambios.

1. Se empleará una fuente regulable en longitud de onda (OLS 1) para poder experimentar a 850nm.

OLS1: 660nm y 850nm

Sensor de potencia: 630nm y 850nm

2. Se dotará al conjunto tubo negro + sonda de rigidez para evitar la diferenciación entre medidas. Ambas sondas se protegen con el tubo opaco.

Hélice y galga sobre agua a 660 nm (dBm)													
Vol	0L	0.5L	1L	1.5L	2L	2.5L	3L	3.5L	4L	4.5L	5L	5.5L	6L
Hélice	-31.64	-32.90	-33.86	-34.02	-34.32	-34.69	-34.98	-34.94	-34.97	-35.44	-35.68	-35.92	-35.96
Galga	-57.58	-58.68	No hay datos										

Tabla 5.4. Medidas calibrado hélice y galga a $\lambda=660$ nm a través de tubo

Hélice y galga sobre agua a 850 nm (dBm)													
Vol	0L	0.5L	1L	1.5L	2L	2.5L	3L	3.5L	4L	4.5L	5L	5.5L	6L
Hélice	-33.66	-35.26	-35.75	-36.05	-36.78	-37.51	-37.67	-37.87	-37.75	-37.89	-36.73	-36.87	-36.94
Galga	-59.74	-59.84	No hay datos										

Tabla 5.5. Medidas calibrado hélice y galga a $\lambda=850$ nm a través de tubo

Conclusiones:

- I) Se reconoce una pérdida de sensibilidad como consecuencia de la respuesta de los dispositivos que determinan la tensión a la salida del fotodiodo, que vemos representado en las gráficas correspondientes a la figura 5.5 . Pues, a pesar de que a 850 nm el ID-F91 presenta mejor rendimiento que a 660 (ver figura 5.5: respuesta espectral), en la fibra óptica se multiplican exponencialmente las pérdidas (atenuación).

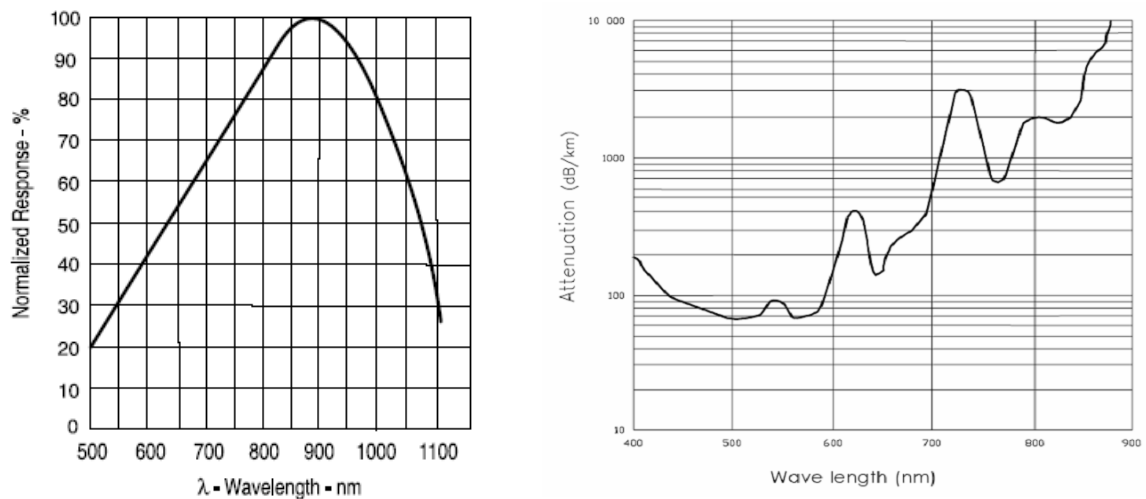


Figura 5.5. Gráficas explicativas pérdidas a 850 nm

➤ Segunda caracterización.

Nueva medida para determinar cual es la morfología más adecuada para la sonda. El motivo es que el acceso al depósito a través del orificio de la sonda se traduce en una mayor sencillez constructiva, pues de otra forma deberíamos idear una forma de fijarlo de forma segura a la tapa del mismo. No obstante, la morfología de algunos de los prototipos impide que puedan introducirse por el orificio de la válvula. Por consiguiente, se introducen las sondas de la siguiente manera:

- Hélice y cable liso a través de válvula superior de aire (dorado).
- Galga, mediante tubo de plástico negro a través de abertura de llenado.

Las medidas se efectuarán a partir de este momento con un intervalo de 2 minutos para estabilización del dato. Además, se conservarán las condiciones de luz para que la medida sea relevante, ya que se ha comprobado que ésta es muy sensible a las variaciones de luz ambientales.

Se comprueba si el hecho de variar la cabeza emisora de la fuente OLS1 modifica la toma inmediata de medidas. Mediante cable liso, medidas en dBm:

Variación cabeza emisora OLS	1	2	3	4	5
630nm	-24,04	-24,45	-24,15	-24,25	-23,67
850nm	-27,5	-27,76	-27,67	-28,15	-28,54

Tabla 5.6. Modificación de la llegada de potencia al alternar dos longitudes de onda

La variación máxima al ir alternando las medidas entre longitud de onda a 660nm y 850nm se cifra en torno a 1dBm, valor significativo, por lo que no se podrá efectuar dichas medidas de forma alterna, sino que habrá que llenar el depósito para ambas longitudes de onda tomando todas las medidas.

Medidas de potencia para el caso de la galga a 660nm

La medida de referencia hace alusión al cable del 10% de potencia del divisor 90/10. Potencia de llegada en dBm.

Galga 660nm													
(L)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
1	-55.64	-55.83	-55.84	-55.99	-56.12	-56.07	-56.10	-56.01	-56.02	-56.10	-56.07	-56.09	-56.08
Ref1	-27.80	-27.81	-27.81	-27.81	-27.80	-27.81	-27.81	-27.80	-27.80	-27.82	-27.81	-27.81	-27.81
2	-57.24	-56.92	-56.96	-56.84	-56.77	-56.72	-56.74	-56.68	-56.65	-56.68	-56.72	-56.68	-56.66
Ref2	-27.80	-27.81	-27.81	-27.82	-27.82	-27.82	-27.82	-27.82	-27.82	-27.82	-27.82	-27.82	-27.82
3	-56.05	-56.09	-56.05	-55.98	-56.39	-56.37	-56.38	-56.39	-56.39	-56.36	-56.39	-56.38	-56.40
Ref3	-30.09	-30.09	-30.09	-30.10	-30.10	-30.10	-30.10	-30.10	-30.10	-30.11	-30.11	-30.11	-30.11
4	-54.85	-56.52	-56.60	-56.67	-56.62	-56.67	-56.69	-56.76	-56.78	-56.76	-56.76	-56.76	-56.77
Ref4	-28.52	-28.52	-28.52	-28.52	-28.52	-28.53	-28.53	-28.54	-28.53	-28.53	-28.54	-28.54	-28.54

Tabla 5.7. Medidas calibrado galga a $\lambda=660$ nm

Medidas de potencia para el caso de la hélice a 660nm

Hélice 660nm													
(L)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
1	-40.72	-42.87	-42.80	-42.82	-42.83	-42.79	-42.81	-42.79	-42.75	-42.74	-42.65	-42.63	-42.54
Ref1	-27.82	-27.86	-27.87	-27.88	-27.88	-27.89	-27.90	-27.90	-27.91	-27.91	-27.91	-27.92	-27.92
2	-42.16	-42.34	-42.39	-42.45	-42.46	-42.43	-42.44	-42.45	-42.43	-42.51	-42.46	-42.49	-42.54
Ref2	-27.14	-27.24	-27.25	-27.25	-27.26	-27.26	-27.26	-27.27	-27.27	-27.39	-27.39	-27.39	-27.39
3	-42.00	-42.81	-42.84	-42.91	-42.91	-42.85	-42.84	-42.85	-42.79	-42.80	-42.83	-42.76	-42.78
Ref3	-28.98	-28.98	-28.99	-28.99	-28.99	-28.99	-28.99	-28.99	-28.99	-29.00	-29.00	-29.00	-29.00
4	-41.13	-41.37	-41.78	-41.89	-41.91	-41.84	-41.84	-41.79	-41.73	-41.78	-41.78	-41.77	-41.83
Ref4	-24.20	-24.20	-24.20	-24.21	-24.21	-24.21	-24.21	-24.21	-24.21	-24.22	-24.22	-24.22	-24.22

Tabla 5.8. Medidas calibrado hélice a $\lambda=660$ nm a través de tubo



Medidas de potencia para el caso de la galga a 850nm

Galga 850nm													
(L)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
1	-59.63	-58.05	-58.30	-58.40	-58.43	-58.45	-58.47	-57.81	-57.88	-57.92	-57.86	-57.79	-57.81
Ref1	-29.01	-29.02	-29.03	-29.03	-29.03	-29.04	-29.04	-29.04	-29.04	-29.04	-29.04	-29.04	-29.05
2	-59.76	-59.83	-59.88	-59.83	-59.83	-59.83	-59.82	-59.82	-60.08	-59.81	-59.78	-59.76	-59.69
Ref2	-29.09	-29.09	-29.09	-29.09	-29.09	-29.09	-29.09	-29.09	-29.09	-29.09	-29.09	-29.09	-29.09
3	-58.31	-58.58	-58.63	-58.54	-58.62	-58.56	-58.62	-58.51	-58.48	-58.33	-58.34	-58.31	-58.62
Ref3	-29.10	-29.10	-29.10	-29.10	-29.10	-29.10	-29.10	-29.10	-29.10	-29.10	-29.10	-29.10	-29.10
4	-59.83	-59.64	-59.54	-59.68	-59.70	-59.74	-59.75	-59.81	-59.83	-59.81	-59.81	-59.81	-59.82
Ref4	-29.04	-29.04	-29.04	-29.04	-29.04	-29.04	-29.04	-29.04	-29.04	-29.05	-29.05	-29.05	-29.05

Tabla 5.9. Medidas calibrado galga a $\lambda=850$ nm

Conclusiones:

- I) A pesar de esperar un tiempo uniforme entre medida y medida para que el dato se estabilice, la galga en ningún caso devuelve un valor fijo de potencia de llegada sino que oscila. Se elige que el dato sea en cada caso el valor más negativo que se observa (mínima potencia de llegada). La variación máxima se cifra en +5 centésimas de dBm.
- II) A la vista de los resultados obtenidos en los ensayos previos, resulta favorable la utilización de la hélice frente a la galga. Pues, registrándose saltos similares entre puntos adyacentes, las pérdidas en la hélice son mucho menores.



5.5 Medidas en galga sobre superficie plana

5.5.1 Medidas en galga completamente pelada

Debido a que las formas que podemos construir con la fibra para introducir por el agujero de la válvula no ofrecen posibilidades de medida, nos planteamos el montaje de la misma construida sobre una superficie plana pegada por un extremo al tapón.

Como consecuencia, es posible configurar una sonda con forma similar a la de una galga. Así el nivel de líquido cubre por cada cantidad una mayor longitud de cable de fibra óptica pelado al recorrer las partes peladas además de las horizontales a la superficie.

- 35 + 30 cm sin pelar
- zona sensible: 10cm de giros de 1.5 cm de paso aproximadamente (6 vueltas completas en 10 cm)

Utilizando el emisor HP (HFBR)

Galga pelada sobre plano				
(L)	0	0.5	1	1.5
1	-41.80	-42.89	-43.79	-44.09
Ref1	-18.81	-18.81	-18.80	-18.80
2	-44.50	-44.84	-44.45	-44.63
Ref2	-18.82	-18.83	-18.83	-18.83
3	-45.24	Medidas irrelevantes		
Ref3	-18.84			

Tabla 5.10. Medidas preliminares galga sobre plano

Conclusiones:

- I) Las pérdidas no son muy altas y los saltos de potencia entre niveles de líquido resultan considerables en estos volúmenes (similares a 1 dBm). No obstante, el nivel que alcanza resulta insuficiente para una medida válida del nivel de combustible de un paramotor.

Notas:

- La medida nunca se estabiliza. Tomo el dato de más pérdidas (el más negativo).
- De la primera a la segunda medida tenemos que repegar la sonda a la regla que sirve de soporte. En el proceso se daña una parte del cable, por eso las pérdidas se multiplican en la segunda medida.



Figura 5.6. Sonda galga grande



Figura 5.7. Detalle sonda galga

Para una sonda idéntica realizamos una nueva prueba preliminar.

Galga pelada sobre plano II				
(L)	0	0.5	1	1.5
1	-40.68	-42.71	-42.79	43.23
<i>Ref1</i>	-19.75	-19.73	-19.72	-19.72
2	-41.14	-42.69	-42.80	-43.03
<i>Ref2</i>	-19.70	-19.70	-19.70	-19.70
3	-41.46	-42.56	-43.14	-43.28
<i>Ref3</i>	-19.69	-19.69	-19.69	-19.71

Tabla 5.11. Medidas preliminares galga sobre plano

Las medidas de referencia son válidas. A continuación vamos a comprobar si se puede medir mayor cantidad de líquido ampliando el rango de medida.



Galga sobre plano II 660nm													
(L)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
1	-41.72	-43.14	-43.26	-43.31	-43.34	-43.29	-43.29	-43.27	-43.26	Medidas irrelevantes			
Ref1	-19.72	-19.71	-19.71	-19.71	-19.71	-19.70	-19.70	-19.70	-19.70				
2	-42.28	-43.20	-43.26	-43.34	-43.36	-43.31	-43.35	-43.36	Medidas irrelevantes				
Ref2	-19.75	-19.75	-19.75	-19.75	-19.74	-19.74	-19.74	-19.74					
3	-42.80	43.02	-43.22	-43.25	-43.28	-43.30	-43.30	-43.31	-43.28	Medidas irrelevantes			
Ref3	-19.75	-19.75	-19.75	-19.75	-19.74	-19.74	-19.74	-19.73	-19.71				
4	-42.44	-43.43	-43.51	-43.57	-43.60	-43.56	-43.64	-43.68	-43.70	-43.74	-43.81	Medidas irrelevantes	
Ref4	-19.56	-19.60	-19.61	-19.62	-19.63	-19.64	-19.66	-19.68	-19.69	-19.72	-19.74		

Tabla 5.12. Medidas calibrado galga sobre plano II

Conclusiones:

- I) Se observa que las pérdidas a las que se ve sometida la sonda son excesivas, por lo tanto más adelante procederemos a practicar la medida por tramos dependiendo de la altura a la que se encuentre, evitando así en cada caso la torsión en una porción del cable.
- II) La medida más relevante se obtiene en el primer medio litro, parece entonces conveniente el uso de esta metodología para medir pequeñas cantidades de líquido



5.5.2 Medidas en galga pelada por tramos

Llegados a este punto de las pruebas, resulta fácil observar cómo las pérdidas (sobre todo las de partida) guardan cierta relación con la geometría y forma de la cabeza sensora. Cuanto más intrincada es su forma mayores pérdidas son producidas. Así pues, resultan de vital importancia conocer cual es el valor del aumento de las pérdidas a medida que, fruto de la construcción de la sonda, el cable se va deformando.

Procedo a configurar la sonda por tramos:

- 35 + 37 cm sin pelar
- 1cm de paso

Primeros 2 cm de sonda:

Galga semipelada sobre plano II				
(L)	0	0.5	1	1.5
1	-33.80	-36.27	-36.97	-37.14
Ref1	-19.73	-19.73	-19.75	-19.74
2	-35.90	-36.36	-36.92	-37.43
Ref2	-19.75	-19.60	-19.78	-19.77
3	-36.43	-36.79	-37.41	-37.68
Ref3	-19.72	-19.73	-19.79	-19.79

Tabla 5.13. Medidas preliminares galga pelada por tramos

Una vez realizada esta medida, construyo otros tres centímetros de galgas para la sonda. Entonces:



Galga semipelada sobre plano									
(L)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	...	6
1	-47.60	-47.94	-48.02	-47.98	-28.20	-28.21	Medidas irrelevantes		
Ref1	-19.80	-19.80	-19.77	-19.80	-19.98	-19.98			
2	-47.62	-48.00	-48.60	-49.11	-49.10	Medidas irrelevantes			
Ref2	-19.80	-19.81	-19.80	-19.81	-19.76				
3	-48.00	-48.33	-48.22	-48.15	Medidas irrelevantes				
Ref3	-19.85	-19.85	-19.85	-19.85					

Tabla 5.14. Calibración galga pelada por tramos

Conclusiones:

- I) Los resultados que obtenemos (véase tabla 5.14) responden a unas pérdidas que se disparan, siendo incluso superiores a las recogidas con la galga construida hasta los 10 cm de altura. Como consecuencia de la pérdida de la mayoría de los modos de luz la medida satura cuando apenas pasamos de 1.5 litros. Lo que se explica desde el número de curvas practicado a la sonda
- II) Se observa que la medida puede realizarse de forma correcta mediante el uso de varios tramos de pocos centímetros cada uno, obteniendo así mayores intervalos y limitando las pérdidas.
- III) Con esta configuración conseguimos que las condiciones lumínicas exteriores no falseen la medida.

No obstante se va efectuar una última comprobación variando la configuración empleada hasta el momento. Por ésta, introducíamos la luz directamente al tramo de fibra con la configuración de galga, evitando las pérdidas que, aunque mínimas, se producían en el tramo recto. Ahora procedo a invertir esta configuración empleando la sonda en dos tramos (hasta 3 litros de máximo).



Galga semipelada sobre plano II							
(L)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
1	-47.02	-47.45	-47.58	-47.56	-47.69	-47.64	-47.74
Ref1	-19.86	-19.83	-19.85	-19.88	-19.91	-19.92	-19.93
2	-47.42	-47.51	-47.63	-47.65	-47.73	-47.77	-47.87
Ref2	-19.93	-19.93	-19.93	-19.93	-19.94	-19.94	-19.94
3	-47.35	-47.52	-47.57	-47.62	-47.57	-47.65	-47.64
Ref3	-19.94	-19.94	-19.94	-19.94	-19.94	-19.94	-19.94

Tabla 5.15. Calibración galga pelada por tramos en dos sectores

Conclusiones:

- I) Se observa una medida bastante inestable. Siendo las pérdidas prácticamente las mismas como cabía esperar. Sí se conserva la variación durante todo el rango propuesto de medida.

5.6 Medidas en hélice a través de la válvula

En anteriores prototipos hemos presenciado la rotura de numerosas sondas como consecuencia de la presión que hemos ejercido sobre ellas para introducirlas en el depósito a través del agujero de la válvula. Investigando formas de acceder al depósito de esta manera, se configura una nueva sonda helicoidal con un paso próximo a 1.5 cm. No obstante, para evitar que pueda dañarse la introducimos por el orificio de llenado del depósito.

Hélice 660nm													
(L)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
1	-37.60	-38.30	-38.86	-39.95	-41.14	-41.29	-41.55	-41.64	-41.70	-41.75	-41.72	-41.73	-41.78
<i>Ref1</i>	-18.91	-18.92	-18.92	-18.91	-18.91	-18.91	-18.91	-18.91	-18.90	-18.91	-18.90	-18.90	-18.90
2	-37.58	-38.53	-39.21	-39.58	-40.07	-41.24	-41.25	-41.44	-41.56	-41.56	-41.74	-41.81	-41.89
<i>Ref2</i>	-18.88	-18.86	-18.84	-18.84	-18.84	-18.84	-18.84	-18.88	-18.88	-18.88	-18.87	-18.87	-18.85
3	-29.52	-32.42	-33.33	-33.92	-34.29	-35.41	-35.44	-35.50	-35.71	-35.78	-35.79	-35.78	-35.77
<i>Ref3</i>	-17.79	-17.80	-17.81	-17.81	-17.81	-17.81	-17.82	-17.82	-17.82	-17.82	-17.82	-17.81	-17.81
4	-30.22	-32.23	-32.87	-33.40	-34.07	-35.13	-35.22	-35.36	-35.55	-35.70	-35.84	-35.82	-35.80
<i>Ref4</i>	-17.79	-17.79	-17.79	-17.80	-17.80	-17.79	-17.80	-17.80	-17.80	-17.79	-17.80	-17.80	-17.80

Tabla 5.16. Calibración hélice a través de válvula

Conclusiones:

- I) Según nos acercamos a los 6 litros de llenado la medida se hace más inestable, al margen de saturarse. Las medidas 2 y 3 se efectuaron en un día distinto a las dos primeras.

Notas:

- La forma del depósito hace que según el llenado del mismo, las variaciones de volumen incidan en mayor o menor medida en la altura del líquido, cubriendo cantidades distintas de cable de fibra óptica (no es un prisma perfecto). Según la altura, los litros de llenado son los que siguen:

(L)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
H(cm)	1.7	3.3	5	6.8	8.6	10.4	12.1	13.8	15.6	17.3	19	20.8	22.9	25.3	28

Tabla 5.17. Tabla proporción de litros y alturas

Si bien, cabe mencionar que dado que el depósito está roto, no se puede llenar el mismo por encima de los 11cm de altura.



Figura 5.8. Depósito a medio llenado

5.7 Medidas en galga sobre tubos metálicos

5.7.1 Medidas en galga completamente pelada

Se propone una nueva sonda cuyo soporte consiste en un par de tubos metálicos en lugar de la regla empleada hasta el momento. Se le practican 10 curvas cuyo paso completo es de 2cm y una amplitud máxima cercana a 1.5 cm.



Figura 5.9. Detalle sonda galga

Utilizando el divisor 90/10, las pérdidas de la nueva sonda, son las siguientes (entrada por el final de la parte curvada, salida tras recorrer la luz las curvas de la hélice):

Galga 660nm									
(L)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	...	6
1	-28.43	-28.41	-28.27	-28.22	-28.20	-28.21	Medidas irrelevantes		
Ref1	-19.96	-19.97	-19.98	-19.98	-19.98	-19.98			
2	-28.19	-28.28	-28.18	-28.11	Medidas irrelevantes				
Ref2	-18.96	-18.95	-18.95	-18.95					
3	-28.40	-28.46	-28.29	-28.28	Medidas irrelevantes				
Ref3	-18.94	-18.93	-18.93	-18.93					

Tabla 5.18. Calibración galga sobre tubos metálicos



Conclusiones:

- I) Tras las primeras medidas no se aprecia ninguna variación de potencia. Es decir, esta sonda no mide.
- II) Se comprueba que las pérdidas de potencia de base (desde que tenemos el depósito vacío) se multiplican con el número de curvas que practicamos a las sondas.

5.7.2 Medidas en galga pelada por tramos

La mayor parte de las pérdidas de luz se producen en las curvas que practicamos sobre el cable de fibra inicialmente liso. Es de igual forma importante minimizar este número de curvas para que no se disparen inútilmente las pérdidas de base y nos acerquemos a la “saturación”.

Se propone una nueva sonda para la que sólo pelaremos la parte curva de la galga que se forma con ella, y sólo en puntos críticos: mitad de depósito y últimos dos litros de combustible.

Suponiendo que nuestro depósito sólo puede contener un máximo de 6 litros de combustible, tendremos que efectuar curvas en los siguientes puntos: 0,5, 1, 1,5, 2 y 3 litros, calibrando las alturas que se alcanzan en el depósito por cada medio litro una a una. Presentamos los resultados en la siguiente tabla, 5.19:

V (L)	0.5 L	1 L	1.5 L	2 L	3 L
H (cm)	1.1	1.8	2.5	3.3	5

Tabla 5.19. Alturas de los diferentes niveles de llenado

De esta manera sabemos exactamente dónde corresponde construir cada curva de la galga.

Además, en esta ocasión vamos a cuantificar las pérdidas que se producen por cada curva que se efectúa en la galga (utilizando divisor 90/10):

Curvas	1(0.5L)	2(1L)	3(1.5L)	4(2L)	5*(3L)
P (dBm)	-18.69	-22.54	-24.26	-26.71	-26.91
Ref (dBm)	-18.78	-18.75	-18.81	-18.83	-18.84

Tabla 5.20. Medidas preliminares galga pelada por tramos sobre tubos I

Conclusiones:

- I) Podíamos decir que, según el grado de curvatura que se ha aplicado en este caso, a partir de 4 curvas ya se han radiado todos los modos, o dicho de otra forma, las pérdidas saturan.



Figura 5.10. Galga pelada por tramos I



Galga pelada por tramos I 660nm							
(L)	0	0.5	1	1.5	2	...	6
1	-31.61	-30.48	-30.83	-30.84	Medidas irrelevantes		
Ref1	-18.85	-18.85	-18.86	-18.86			
2	-30.69	-30.64	Medidas irrelevantes				
Ref2	-18.80	-18.80					

Tabla 5.21. Calibración galga pelada por tramos sobre tubos

Esta sonda no sirve para medir.

Notas:

- Cabría mencionar que para hacer la quinta curva pelada se ha incurrido en una curva más (sin pelar) por necesidades de construcción. Por tanto, a esta sonda se le practican un total de 6 curvas. (Ver figura 5.10)
- Las alturas al llenar el depósito no se alcanzan de forma regular. Es decir, cada medio litro no supone un ascenso homogéneo de nivel porque el depósito no es un prisma perfecto, incluso por la base.

Con las dimensiones de la anterior sonda se configura una idéntica a la anterior poniendo especial cuidado en no rallarla al pelar, elemento determinante en la luz radiada y como consecuencia en las pérdidas.

Curvas	1(0.5L)	2(1L)	3(1.5L)	4(2L)	5*(3L)
P (dBm)	-15.16	-15.53	-16.41	-18.72	-22.70
Ref (dBm)	-18.84	-18.84	-18.84	-18.83	-18.83

Tabla 5.22 Medidas preliminares galga pelada por tramos sobre tubos II

Galga pelada por tramos II 660nm										
(L)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	...	6
1	-22.75	-22.98	-23.20	-23.32	-23.55	-23.63	-23.91	Medidas irrelevantes		
Ref1	-18.74	-18.74	-18.74	-18.74	-18.74	-18.74	-18.74			

Tabla 5.23 Calibración galga pelada por tramos sobre tubos II

Aparte de conservarse las pérdidas de partida, los intervalos de variación de potencia no parecen ser suficientes para una medida efectiva. Tampoco sirve para medir.

Se observa que la única diferencia existente entre la primera semipelada y los prototipos restantes reside en que la primera poseía unas curvas ligeramente más acentuadas, lo que repercutía en un mayor cambio en la potencia de llegada cada vez que el líquido superaba la superficie curvada, aparte de aumentar las pérdidas de partida. Por tanto, se procede a modificar la última galga planteada. La modificación consiste en cerrar ligeramente las curvas. Como consecuencia obtenemos los datos presentados en la tabla 5.24:

Semipelada III – modificada	0 L	0.5 L
P (dBm)	-24.03	-25.88
Ref (dBm)	-17.43	-17.42

Tabla 5.24. Detalle pérdidas según número de curvas practicadas

Con la primera prueba se observa cómo las pérdidas de inicio aumentan (-24dBm) y el primer medio litro de agua vertido sitúa dichas pérdidas en -25.88dBm (salto de casi 2 dBm).



Por tanto se plantea una nueva sonda consistente en un número de curvas igual al número de puntos críticos a determinar de forma idéntica a la anterior. Con la salvedad de que la mitad de depósito se supondrá en los 6 litros, ya que es una medida más realista dada la aplicación final del dispositivo (depósito de combustible de 12 litros de capacidad); siendo además la cantidad máxima de líquido con que podemos trabajar. Las nuevas alturas son las siguientes, teniendo ahora en cuenta la sucesión particular de las alturas de nivel:

V (L)	0.5 L	1 L	1.5 L	2 L	6 L
H (cm)	1.1	1.8	2.5	3.3	10.4

Tabla 5.25. Alturas reales de los diferentes niveles de llenado

Se procede además a modificar la configuración y situación de las curvas:

- Se situará el tramo de fibra pelada con la curva en el centro de la altura cubierta por cada medio litro (resolución máxima del sistema).
- Las curvas serán de idéntica dimensión.

La prueba preliminar, efectuando una sola curva, devuelve los siguientes resultados:

Semipelada III	0 L	0.5 L
P (dBm)	-14.98	-16.54
Ref (dBm)	-17.44	-17.46

Tabla 5.26. Variación primer escalón de llenado pelada por tramos II

El intervalo (más de 1.5 dBm) parece suficiente para efectuar una medida efectiva.



Dependiendo de la construcción física de la sonda trabajamos con un determinado valor de pérdidas, función de la curvatura de la galga, que determina el margen dinámico (rango máximo en dBm que puede variar la medida). Dichas pérdidas, como ya hemos dicho, aumentan según se cierra la curva. Si:

$$P_o - P_i - Losses = MD$$

Sabiendo que la sensibilidad de nuestro sistema se mide en dBm/L, y siendo el total de dBm una constante dependiente del sistema:

$$dBm/L \times n^\circ L = dB_T \leq MD$$

Galga pelada por tramos III 660nm						
(L)	0	0.5	1	1.5	2	6
1	-41.64	-41.56		-40.71		
Ref1	-17.49	-17.54		-17.55		

Tabla 5.27. Calibración galga pelada por tramos sobre tubos III

Conclusiones:

- I) Las pérdidas se han multiplicado por efecto de unas curvas más cerradas y la sonda no mide, se han radiado todos los modos de luz

Se propone una nueva sonda con unas curvas ligeramente menos cerradas. Esto resultaría imposible de no efectuar dichas curvas a ambos lados de los tubos. Mediremos las pérdidas que se producen a medida que se fabrica dicha sonda como prueba preliminar. Los resultados se presentan en la tabla 5.28:

Curvas	1(0.5L)	2(1L)	3(1.5L)	4(2L)	5*(6L)
P (dBm) agua	-21.03	-17.41	-19.02	-17.85	-26.19
Ref (dBm)	-17.61	-17.66	-17.68	-17.66	-17.74

Tabla 5.28. Pérdidas surgidas según se van practicando curvas (galga pelada por tramos sobre tubos III)

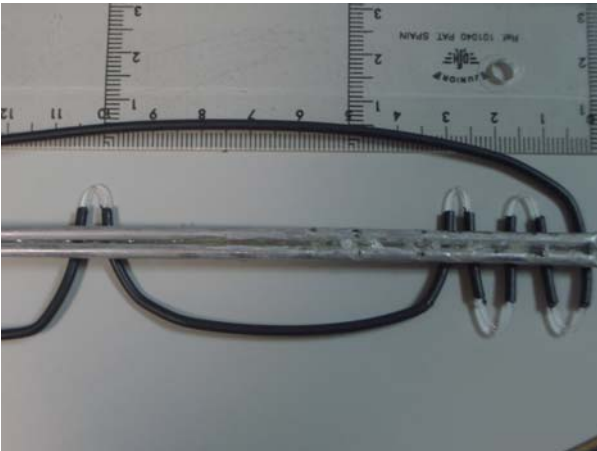


Figura 5.10. Galga pelada por tramos

Galga pelada por tramos III								
(L)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	5.5	6
1	-26.19	-26.72	-27.28	-28.24	-28.44	-28.47	-28.42	-29.30
Ref1	-17.48	-17.48	-17.48	-17.48	-17.49	-17.49	-17.49	-17.50
2	-27.03	-27.85	-29.15	-29.49	-29.76	-29.77	-29.84	-30.73
Ref2	-17.50	-17.50	-17.51	-17.51	-17.51	-17.51	-17.50	-17.50
3	-28.87	-29.12	-29.31	-30.17	-30.33	-30.34	-30.33	-31.47
Ref3	-17.95	-17.95	-17.95	-17.96	-17.96	-17.96	-17.96	-17.96
4	-29.10	-29.54	-29.78	-30.38	-30.94	-30.94	-30.90	-31.99
Ref4	-17.96	-17.96	-17.95	-17.96	-17.96	-17.95	-17.96	-17.96

Tabla 5.29. Calibración galga pelada por tramos sobre tubos III



Conclusiones:

- I) Se observa que los intervalos de cambio que se manejan con esta sonda sí que permiten una medida del volumen de líquido en reserva.
- II) La variación es mínima entre 2 y 5.5 litros (ambos inclusive). Esto se debe a la construcción de la sonda, ya que no hemos dispuesto ninguna curva entre dichas alturas correspondientes a esos litros, precisamente porque no aportan información relevante.
- III) No afecta el hecho de que la fibra se quede mojada entre dos mediciones consecutivas porque la mayoría de la superficie permanece sin pelar.

Notas:

- Entre las medidas **2** y **3** se rectifica la primera curva (de 0.5 litros) para aumentar el intervalo de potencia de 0 a 0.5 litros. Lo que provoca que, unido a una disminución de la potencia de luz entregada por el emisor -*Ref3*- la potencia de llegada haya disminuido aumentando las pérdidas.



6. DESARROLLO DEL DISPOSITIVO

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas efectuadas con los componentes del sistema y se incluye el presupuesto del mismo.

6.1 Sistema final

Debido a distintas modificaciones que nos vemos obligados a incluir, la alimentación se fija finalmente a 6 voltios (ver 4.2. Alimentación), con lo que el sistema final atiende al siguiente patrón de comportamiento obtenido de la salida de tensión del fotodiodo (véase tabla 6.1):

Semipelada VII Alimentación a 6V								
(L)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	5.5	6
1	3,49	3,00	2,49	2,10	1,97	2,03	2,12	1,74
2	3,46	3,17	2,56	2,23	2,20	2,19	2,18	1,72
3	3,70	3,08	2,60	2,29	2,27	2,28	2,29	1,73
4	3,39	3,21	2,89	2,32	2,18	2,16	2,19	1,60

Tabla 6.1. Calibración sistema. Litros vs V(fotodiodo)

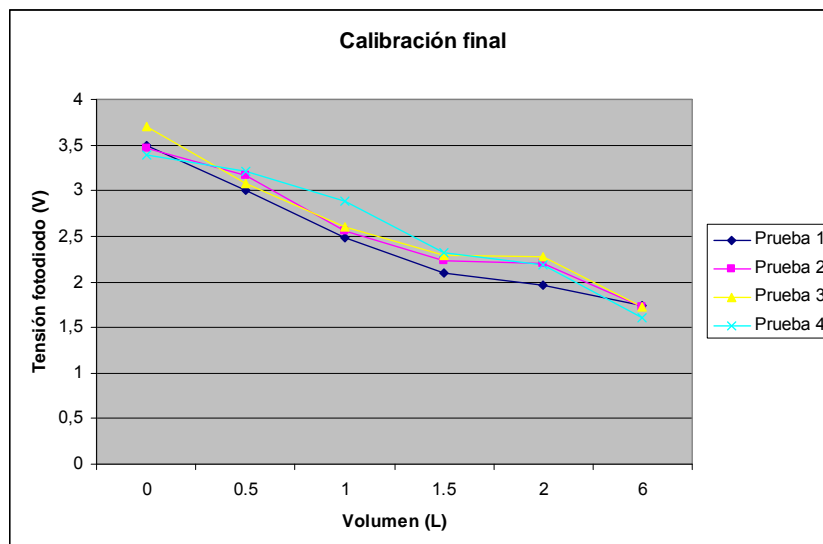


Figura 6.1. Caída de tensión en el fotodiodo. Alimentación 6 voltios



Nota: Se observa que el comportamiento es muy semejante al registrado en la calibración a 3 voltios, conservándose las características de linealidad y repetibilidad registradas.

Conclusiones:

- Las medidas que no deberían experimentar cambios apenas modifican el valor de dos litros en alguna décima de voltio siendo consecuentes con la medida que pretende efectuarse.
- Para reproducir condiciones iniciales semejantes es necesario emular las condiciones en que se sitúa el cable de fibra en las nuevas tomas de datos. Entonces parece que la solución pasa por dejar el sistema en una posición que no permita la variación en la posición de la fibra, ya que las condiciones del montaje no nos permiten situar el fotodiodo más cerca del depósito con la intención de minimizar las posibles variaciones en la posición de la fibra.

Ahora se hace imprescindible fijar unos valores a los que el sistema pueda asociar los niveles de combustible que se han indicado como críticos y que, por tanto, han de ser fácilmente interpretables por el usuario del paramotor. Como consecuencia de las tensiones anteriores, se extraen unos valores fijos, presentes en la tabla 6.2, a los que el sistema va a interpretar el cambio en el volumen de combustible:

Valores niveles	3,4 V	3 V	2,4 V	2,1 V	1,95 V	1,5 V
-----------------	-------	-----	-------	-------	--------	-------

Tabla 6.2. Tabla de valores de referencia comparadores

Las tensiones van a determinar unas resistencias que fijen dichos valores como referencia en la comparación y que se conectan a la patilla positiva de los operacionales. Tratamos de buscar un valor de los menores de los obtenidos experimentalmente para que, una vez rebasado ése valor (el depósito se vacía paulatinamente, la tensión en la patilla negativa aumenta) se produzca el cambio en la visualización. Buscamos que por la red de resistencias circule una corriente mínima y que eso redunde en un menor desgaste de la pila. Por eso fijamos este valor en 20 μ A. En consecuencia, las resistencias obtenidas son las siguientes:



$$R7 = \frac{V6}{I} = \frac{1,50}{20\mu} = 75k$$

$$R6 = \frac{V6 - V5}{I} = \frac{0,45}{20\mu} = 22,5k$$

$$R5 = \frac{V5 - V4}{I} = \frac{0,15}{20\mu} = 7k5$$

$$R4 = \frac{V4 - V3}{I} = \frac{0,3}{20\mu} = 15k$$

$$R3 = \frac{V3 - V2}{I} = \frac{0,6}{20\mu} = 30k$$

$$R2 = \frac{V2 - V1}{I} = \frac{0,4}{20\mu} = 20k$$

$$R1 = \frac{6 - V1}{I} = \frac{2,6}{20\mu} = 130k$$

Por otro lado, la tensión de saturación actual de los amplificadores operacionales es próxima a los 5 voltios, por lo que situamos resistencias de protección para limitar la corriente que circula entre sus terminales según especificaciones del fabricante: 52Ω.

Añadir que el comportamiento del sensor puede verse alterado por la modificación del líquido que llena el depósito, pasando de agua a combustible. Si bien esta modificación, traducida en la variación del índice de refracción de la luz en el medio, se neutraliza mediante la recalibración del potenciómetro de carga.

6.2 Caracterización de la tensión de salida de los fotodiodos

Se presentan las medidas de la calibración de la tensión en los fotodiodos empleados en el sistema de medida. Dicha tensión depende de la resistencia de carga que empleemos.

Para una R_L de $10M\Omega$:

Galga pelada por tramos III						
(L)	0	0.5	1	1.5	2	6
V1(mV)	434	371	312	279	243	199
Ref(dBm)	-22.80	-22.71	-22.72	-22.72	-22.72	-22.72
V2(mV)	387	355	314	304	268	222
Ref2(dBm)	-22.62	-22.62	-22.62	-22.62	-22.62	22.62
V3(mV)	446	383	357	306	284	232
Ref3(dBm)	-22.62	-22.62	-22.62	-22.62	-22.62	-22.62
V4(mV)	420	360	330	284	257	216
Ref4(dBm)	-22.62	-22.62	-22.63	-22.63	-22.63	-22.63

Tabla 6.3. Calibración fotodiodo sistema

Tras una corrección de la geometría de la sonda, la caracterización nos devuelve los siguientes datos (tabla 6.3):

Galga pelada por tramos VI						
(L)	0	0.5	1	1.5	2	6
V1(mV)	285	251	210	158	142	127
Ref(dBm)	-23.24	-23.21	-23.21	-23.20	-23.20	-23.19
V2(mV)	333	302	270	235	214	177
Ref2(dBm)	-23.19	-23.19	-23.19	-23.19	-23.19	-23.19
V3(mV)	388	341	303	258	231	187
Ref3(dBm)	-23.22	-23.22	-23.22	-23.22	-23.22	-23.22
V4(mV)	341	280	238	210	210	178
Ref4(dBm)	-23.22	-23.22	-23.21	-23.22	-23.21	-23.21

Tabla 6.4. Calibración sonda definitiva sistema

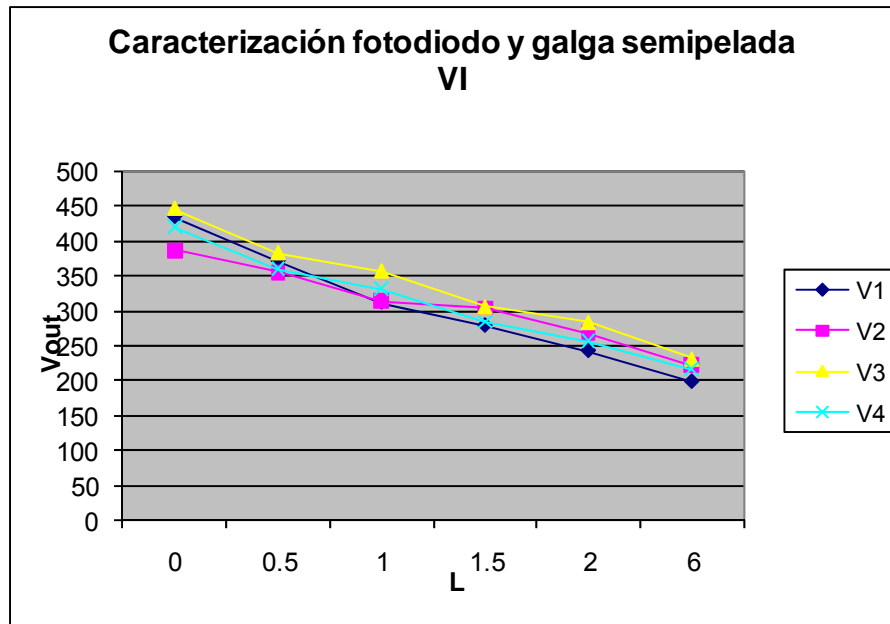


Figura 6.2. Caída de tensión del fotodiodo

De las anteriores gráficas (6.1 y 6.2) extraemos un par de características básicas de la medida:

-Repetibilidad. Las sucesivas series de datos apenas difieren, superponiéndose en la gráfica.

-Linealidad. Las medidas, en cada una de las tres tomas sucesivas, asemejan su comportamiento al de una recta. No obstante no podemos decir que se trate de un sistema lineal en relación al número de litros de combustible que aloja el depósito, pues el dato correspondiente a 6 litros no sigue la progresión existente hasta el dato anterior (1/2 litro). Recordamos que estos valores corresponden a los volúmenes y en consecuencia a las alturas para las que se diseñó la sonda.



6.3 Diferencias en la tensión de partida. Offset

Las condiciones de la sonda, al no existir un soporte rígido sobre el que se distinga la fibra sin pelar, son difíciles de conservar. En consecuencia, la posición de la sonda no va a ser habitualmente la misma sobre todo al comenzar a medir. Así podemos falsearla al no comenzar con pérdidas de partida (depósito vacío) idénticas a la calibración fruto de la disposición primitiva de la fibra, ya que las torsiones por mínimas que parezcan afectan a las pérdidas en el cable de fibra, y por tanto a la salida del sensor.

Por otro lado, la metodología de estudio del comportamiento de la sonda en laboratorio ha puesto de manifiesto otro aspecto importante. En tomas sucesivas de datos, con apenas unos minutos de intervalo entre toma y toma, se observa que las condiciones de la tensión de partida cambian a pesar de situar la sonda rígidamente, y por tanto derivándose las mismas pérdidas como consecuencia de la posición de la fibra. Este efecto desaparecía si se abandonaba la sonda en una posición para seguir efectuando medidas pasado como mínimo un día. Este efecto era parcialmente reproducible en el caso de secar la fibra con la ayuda de un paño o bajo un secamanos. Lo que nos lleva a pensar que el “efecto mojado” altera el comportamiento, suponiendo un offset adicional a la tensión de partida.

El efecto se ha tratado de determinar mediante el siguiente estudio: se efectuaron tres medidas con tiempo de recuperación variables entre ellas.

Tiempos de recuperación entre medidas:

Medidas	T
1 – 2	∞
2 – 3	7 min
3 – 4	19 min

El tiempo total de recuperación se estima aproximadamente en 45 minutos. Vamos a tratar de obtener la medida de los intervalos que se producen entre volúmenes de líquidos sucesivos, teniendo en cuenta que la variación de luz emitida (R_{ef}) es despreciable. De esta forma, manejando valores relativos (a la medida anterior) eliminaremos la componente de “offset” que introduce el hecho de que la sonda pueda no encontrarse completamente seca entre dos empleos sucesivos de la misma.



(L)	0 – 0.5	0.5 – 1	1 – 1.5	1.5 – 2	2 – 6
V1(mV)	63	59	33	36	44
V2(mV)	32	41	10	36	46
V3(mV)	63	26	51	22	52
V4(mV)	60	30	46	27	41
Media	54.5	36.5	35	30.25	45.75

Tabla 6.5. Media del la variación entre puntos consecutivos

Estos intervalos son consecuencia de la altura a la que se encuentre la curva correspondiente del nivel de líquido determinado además de la geometría de la misma.

Conclusiones:

- I) De esta tabla obtenemos que el tiempo de espera es crucial para obtener el punto de pérdidas de partida. Las medidas 1 y 2 fueron efectuadas en días distintos, con lo que la recuperación entre una y otra fue total.
- II) Como cabía esperar, el intervalo que más se manifiesta es el de depósito vacío-1/2 litro de combustible.

Todas estas consideraciones, afectan al sistema por interferir en las pérdidas suponiendo un añadido a las ocasionadas por efecto del volumen de líquido, pero no resultan críticas pues el funcionamiento práctico del sistema va a ser el vaciado, afectando por igual a todos y cada uno de los niveles a determinar (Offset). Además, el modelo de sonda finalmente utilizado (semipesada) limita la superficie de fibra expuesta, por lo que el efecto se va a ver aún más reducido.



6.4 Estudio de costes

A continuación presentamos el presupuesto de los materiales empleados en el proyecto, no hemos considerado la mano de obra empleada en el mismo. Se confirma que el coste del dispositivo es bajo en comparación con el de la plataforma (el precio de un paramotor puede rondar los 6.000 euros – vela incluida).

Concepto	Unidades	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste(€)
Fibra óptica de plástico	1,5 m	150m	385	3,85
Tubos metálicos soporte	2 (60 cm)	1	0,2	0,4
Resistencias	15	1	0,03	0,45
Fotodiodo IF-D91	1	1	2,19	2,19
Amplificador	2	25	0,066	0,13
Placa circuito impreso	5"	1	0,45 \$/inch	1,78
Pegamento	1ml	10 ml	7,89	0,79
Portapilas ZOC 2032	1	1	0,45	0,45
Batería 2032	2	1	1,2	2,4
LEDs	7	10	1,13	0,79
Velcro negro	8cm ²	25 cm ²	1	0,32
Emisor HFBR 1528	1	1	11,86	11,86
Cable	2	330m	0,003	0,01
Caja opaca (5 x 5cm)	1	1	0,4	0,4
			Total	25,82 €

Tabla 6.6. Costes de material

Aclaraciones a las partidas de costes:

- La unidad mínima de fibra de cable corresponde con una bobina de 110m
- Contando con que un chip de LM 324 cuenta con 4 amplificadores, para implementar el sistema base necesitamos un total de 2 integrados.
- Precios de los componentes obtenidos del catálogo on-line de Farnel,
- Placa de circuito impreso estimada por Advanced Circuits (barebonespcb.com, cambio euro-dólar 24/10/2008)
- Se necesita aproximadamente 1ml de pegamento de contacto para construir la sonda.
- Una caja opaca para alojar el circuito impreso.
- El velcro para fijar los LED de visualización.

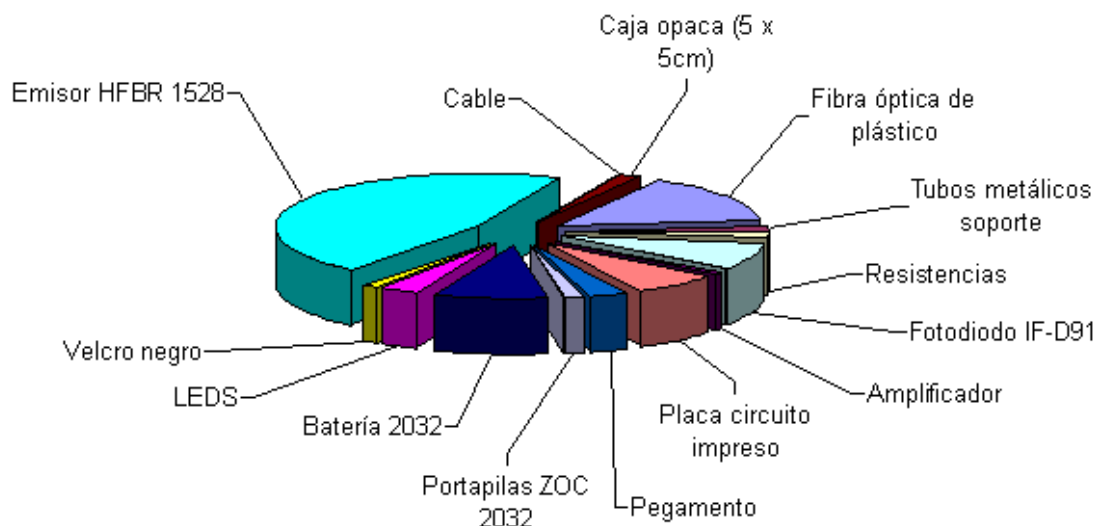




Figura 6.3. Gráfico de reparto del presupuesto

Observar que, por detrás del emisor HFBR, la mayor parte del precio del proyecto lo supone la alimentación autónoma (conjunto batería 2032 más portapilas ZOC 2032), además del cable de fibra óptica de plástico de la sonda.

Cabe destacar que por economía de escala, si recurrimos a lotes grandes, el precio unitario de referencia baja y en consecuencia el del sistema de sensado. Además, el sistema resulta fácilmente instalable para el usuario, lo que redunda en su bajo precio.



7. PROPUESTA DE MEJORAS DEL SISTEMA

Como consecuencia del trabajo en laboratorio y la familiarización con el material, a continuación planteamos nuevas mejoras teóricas para que consten en la presente memoria pero que no se incluyen en el prototipo.

7.1 Mejoras teóricas al sistema.

Las mejoras que se comentan a continuación son planteadas de forma exclusivamente teórica, no siendo implementadas en el sistema final presentado.

Centrándonos en la variabilidad de valores que se observa en la medida una vez iniciamos la misma y que determina el valor de tensión al cual se encuentran los intervalos, no así la diferencia entre dos valores consecutivos de tensión, caracterizamos una nueva sonda sin reparar en los valores iniciales en cada una de las tomas de datos.

Galga pelada por tramos VI						
(L)	0	0.5	1	1.5	2	6
V1(mV)	285	251	210	158	142	127
<i>Ref(dBm)</i>	-23.24	-23.21	-23.21	-23.20	-23.20	-23.19
V2(mV)	333	302	270	235	214	177
<i>Ref2(dBm)</i>	-23.19	-23.19	-23.19	-23.19	-23.19	-23.19
V3(mV)	388	341	303	258	231	187
<i>Ref3(dBm)</i>	-23.22	-23.22	-23.22	-23.22	-23.22	-23.22
V4(mV)	341	280	238	210	210	178
<i>Ref4(dBm)</i>	-23.22	-23.22	-23.21	-23.22	-23.21	-23.21

Tabla 7.1. Nueva calibración sonda definitiva (pelada por tramos VI)

Se observa la importancia del valor de origen en cada una de las medidas efectuadas (Offset).

7.1.1 Compensación

Para corregir este offset se propone situar unido con el cable de la galga (90%) el otro cable procedente del divisor 90/10. De esta forma reproducimos las pérdidas por situación del cable de fibra pelado y podemos referenciar a ellas la medida. La inclusión de esta mejora hace innecesario el uso de cualquier resistencia de carga variable y la calibración por parte del usuario, obteniéndose valores absolutos.

A continuación utilizaríamos un conversor AD y cierta lógica (operacionales) para representar la medida. Aunque podríamos prescindir del conversor y emplear únicamente comparadores que reproduzcan el estado del depósito, como podemos ver en la figura 6.1:

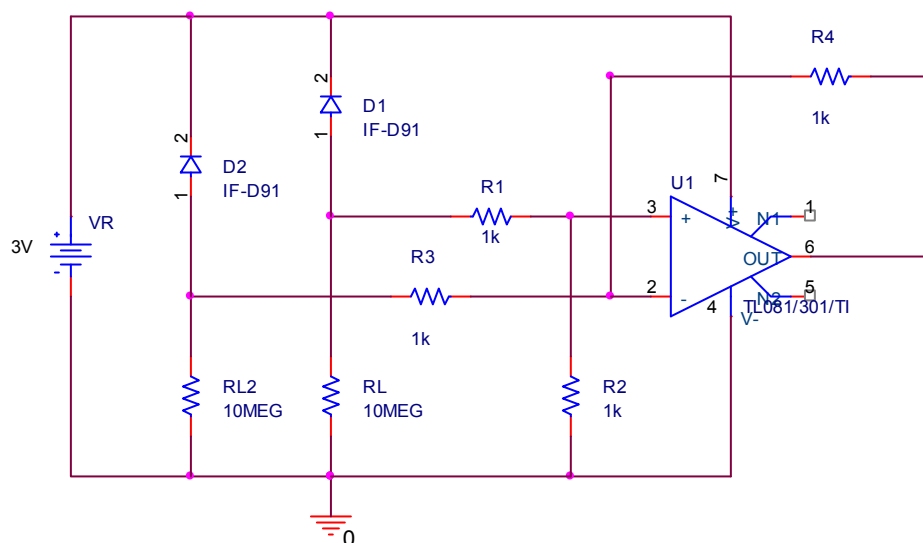


Figura 7.1. Esquema de circuito compensado 1

Dado que la luz que nos llega de la referencia es superior en todo momento a la que podemos obtener de la toma de medidas, nos es necesario atenuar aquella tensión para que no enmascare el dato para el caso de un amplificador operacional en configuración restador. Vale la pena mencionar que para evitar efectos de carga indeseables:

$$R5//R6 \ll R2$$

Además, necesitaremos un factor de amplificación por el que obtengamos a la salida un rango de valores admisible por el operacional, esto es el intervalo entre V_{cc} y V_{ee} , es decir: 0 – 3V. Para ello buscamos un buen factor de amplificación, teniendo en cuenta por la calibración del sistema que el fondo de escala es de unos 200mV, necesitaremos un factor de amplificación próximo a 100. La representación es la siguiente: (figura 6.2)

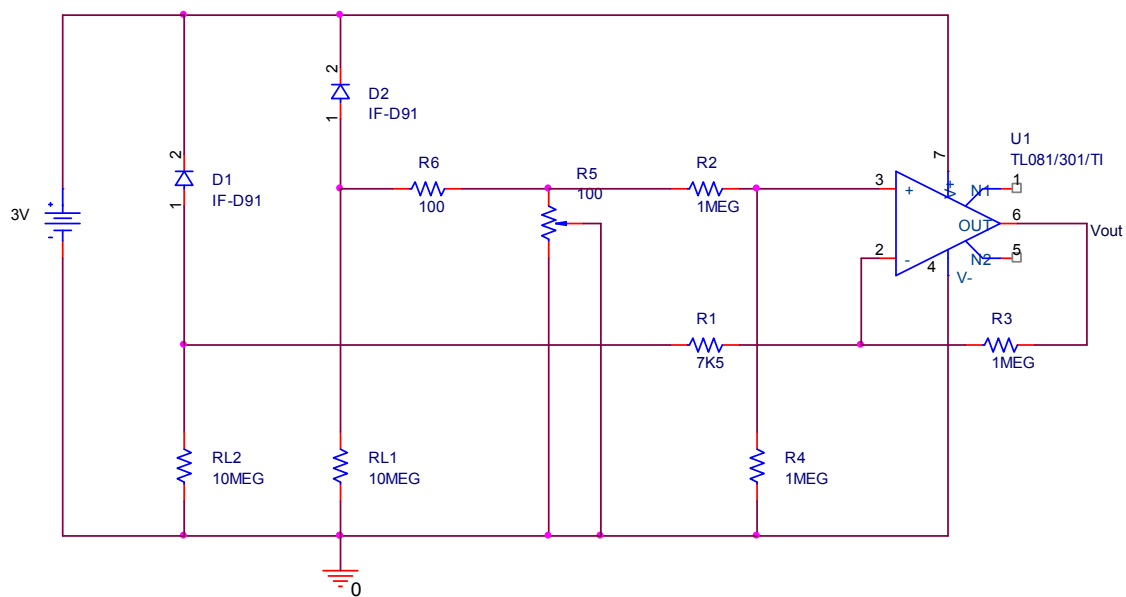


Figura 7.2. Esquema de circuito compensado 2

El potenciómetro permite reducir la tensión en el terminal positivo del amplificador operacional, haciéndolo comparable al terminal negativo donde **D1** recoge la señal de luz del **nivel del depósito** (señal a amplificar) y **D2** es el diodo que da muestra de las **pérdidas de referencia** en la fibra.



Valores de las resistencias para un restador:

$$V_0 = V_2 \frac{R4 \cdot R1 + R4 \cdot R3}{R1 \cdot R2 + R1 \cdot R4} - V_1 \frac{R3}{R1}$$

si $R1=R3$ y $R2=R4$, entonces:

$$V_0 = V_2 \frac{R3}{R2} - V_1$$

Donde

$$R1= R3=7k2\Omega$$

$$R2= R4=1M\Omega$$

$$R5=100\Omega \text{ (Potenci3metro)}$$

$$R6=100\Omega$$

Con estos valores no amplificamos la se1al que llega de referencia y el factor de amplificaci3n del valor de volumen de l3quido en el dep3sito es superior a 100.

En reposo, es decir, con el dep3sito vac3o, la salida del fotodiodo de referencia nos ofrece 3.25 V, mientras que el diodo procedente del dep3sito ofrece una tensi3n de 1.27 V, por lo que parece que el intervalo de atenuaci3n de la red potenciom3trica (valor de la resistencia igual al valor del potenci3metro, osea desde $\frac{1}{2}$ hasta atenuaci3n total) debe ser adecuado para que el valor de las dos entradas pueda ajustarse y as3 la salida del operacional quede a cero.



7.1.2 Resistencia variable de carga.

Variante 1

Como segunda opción para compensar las fluctuaciones de potencia relativas a la posición del cable de fibra óptica y, dado que se comprueba que la potencia lumínica que llega al diodo de referencia es mayor que la que llega al propio del depósito, procedemos a situar una resistencia de carga variable en este segundo diodo. Además haremos uso de un buffer en ambos diodos para evitar efectos de carga indeseables.

Tensión generada en ambos fotodiodos debidamente alimentados funcionando de forma autónoma:

Nombre	Posición	R _L	V (v)
D1	Depósito	10M	0.22
D2	Referencia	5M	3.36

Tabla 7.2. Tabla de resistencias de carga y tensiones en ambos fotodiodos

Si el valor de la señal del diodo de referencia se atenúa mediante el ajuste de la resistencia de carga variable al valor de tensión ofrecido por el otro fotodiodo, necesitaremos un factor de amplificación (G) próximo a 10 para obtener valores de voltios a la salida del operacional y poder realizar la decodificación. Así:

$$G = \frac{R_2}{R_1} \approx 10$$

Donde:

R2=10K

R1=1K, en el esquema: (figura 7.3), R1=R2=1K, R3=R4=10k

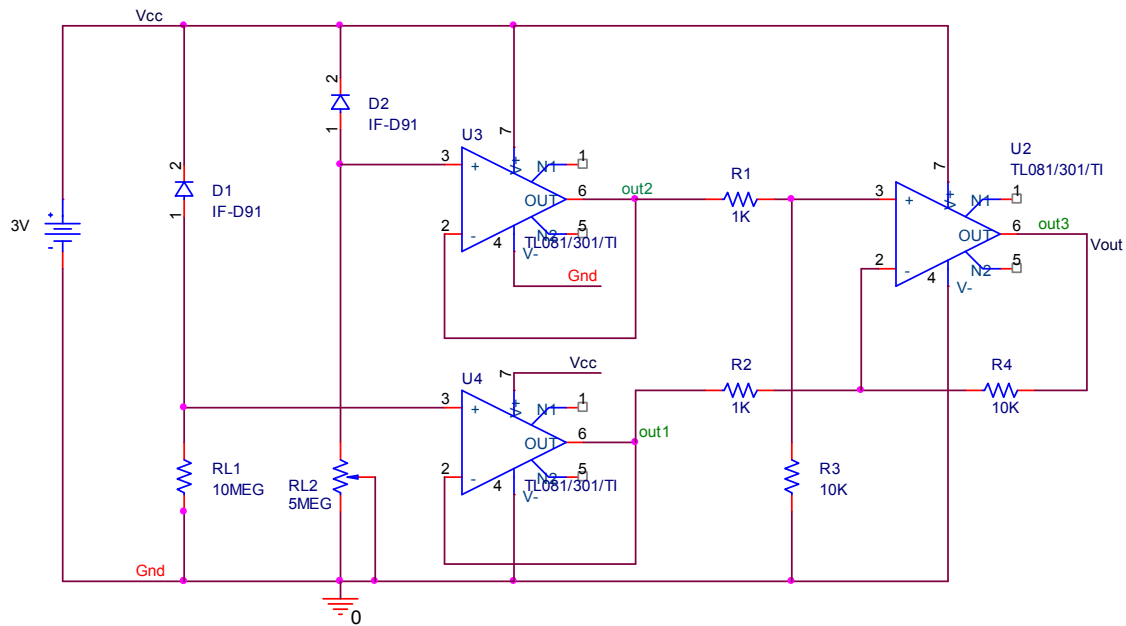


Figura 7.3. Esquema de circuito compensado 3

La anterior configuración no arroja datos satisfactorios pues la resolución, relacionada con el paso mínimo del potenciómetro es insuficiente para generar un cero (o valor próximo a cero) como valor de partida. Pasamos a utilizar como resistencia de carga una serie formada por un potenciómetro y una resistencia de alto valor (4M2).

Variante 2

Para resolver el problema de la compensación alimentamos el operacional a +3 V y -3 V en lugar de entre Vcc y tierra. Además, se incluye un potenciómetro multivuelta de valor 2MΩ como resistencia de carga del fotodiodo de referencia, como vemos en la figura 7.4:

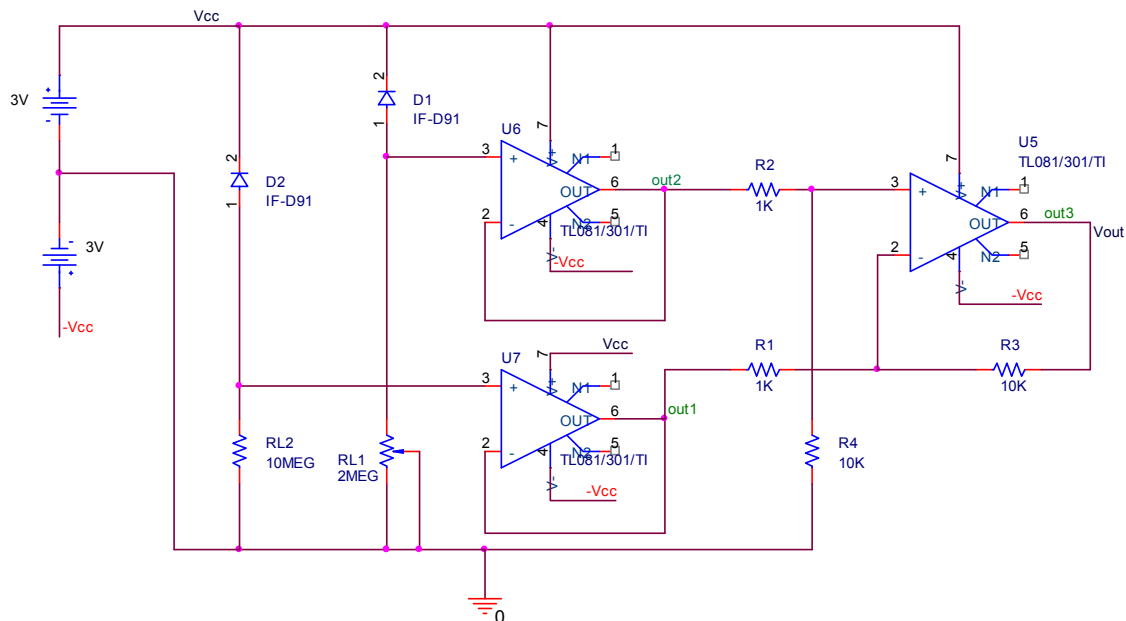


Figura 7.4. Esquema de circuito compensado 4

Nota: D1: depósito, D2: referencia

De esta forma conseguimos el valor nulo de tensión a la salida. Además, reduciendo la luz que llega al diodo del depósito (reproduciendo las consecuencias del llenado del depósito) obtenemos una tensión negativa creciente, que podemos hacer positiva con un inversor, a la salida. Pero existe el inconveniente de la dificultad constructiva para montar en el dispositivo final la alimentación con las dos polaridades. Entonces cabe plantearnos dos alternativas:

1. Hacer uso de dos pilas para generar las tensiones con dos polaridades
2. Emplear otro amplificador comercial que no presente los problemas que el TL081 presenta al alimentarlo entre Vcc y Gnd, como puede ser un MC34071.

A continuación vamos a emplear un nuevo operacional en lugar del TL081. Se trata de un LM324, que nos permite alimentarlo no simétricamente según las especificaciones de nuestro circuito (ver esquema compensado con LM324 en la siguiente figura: 7.5):

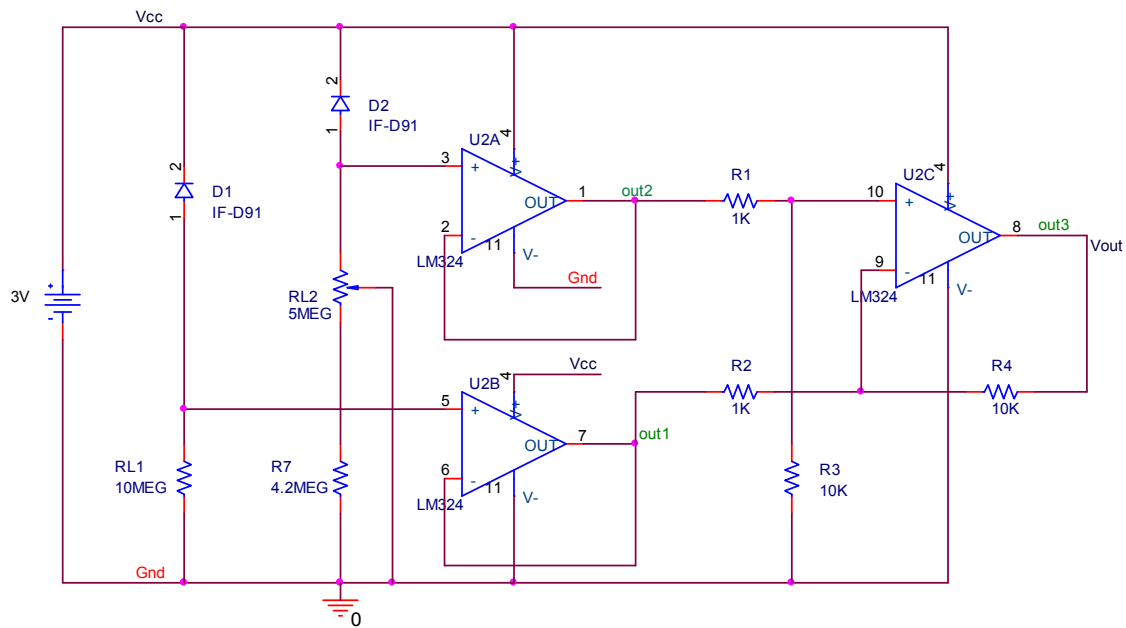


Figura 7.5. Esquema de circuito compensado 5



7.1.3 Alimentación

Se aprecia como, con la alimentación autónoma finalmente propuesta (2 pilas en serie de 3 voltios cada una), la descarga de las pilas es demasiado rápida como para suponer un sistema eficaz. Por eso, buscamos métodos que nos permitan ahorrar consumo de las baterías.

Los consumos de cada uno de los elementos del sistema son los siguientes.[20]

- LM 324 (2 unidades). Consumo de 50 mA por chip, total 100 mA.
- HFBR 1528 emitter. Consumo próximo a 80 mA con la tensión de alimentación de 6 voltios.
- Red de resistencias. Consumo próximo a 20 μ A. Despreciable.
- Suponiendo que el consumo del fotodiodo lo determina la red de resistencia de carga, el consumo del mismo es próximo a 0,6 mA.

La descarga de las pilas se produce rápidamente puesto que el consumo del sistema es algo superior al valor nominal de descarga de las pilas, esto es 200mA/h. Como no necesitamos que la visualización de los resultados sea permanente, podemos “apagar” el sistema con la introducción de un microcontrolador de bajo consumo, encendiéndolo una fracción de tiempo para ahorrar consumo. De esta forma, el sistema tendría un funcionamiento intermitente, y los LEDs de la visualización parpadearían.

8051

La Familia de MC-8051 es variada, y se encuentra en diversas presentaciones (ver figura 7.6), la selección de uno o de otro tipo de microcontrolador dependerá principalmente de las necesidades a satisfacer. El mc-8051 está basado en los microprocesadores de 8 bits, contiene internamente un CPU de 8bits, 3 puertos de entrada y salida paralelos, un puerto de control, el cual a su vez contiene; un puerto serie, dos entradas para Timer/Contador de 16 bits, dos entradas para interrupciones externas, las señales de RD y WR para la toma o almacenamiento de datos externos en RAM, la señal de PSEN para la lectura de instrucciones almacenadas en EPROM externa. Gracias a estas tres señales el mc-8051 puede direccionar 64 K de programa y 64K de datos separadamente, es decir un total de 128Kb.

Además cuenta con 128 bytes de memoria RAM interna. Además el mC-8051 puede generar la frecuencia (Baud Rate) de Transmisión/Recepción de datos por el puerto serie de manera automática partiendo de la frecuencia del oscilador general, por medio de la programación del Timer 1. Dicha frecuencia de transmisión puede ser cambiada en cualquier momento con solo cambiar el valor almacenado en el control o también se puede duplicar o dividir la frecuencia con solo escribir sobre el bit 7 (SMOD) del registro de control (PCON). [25]



Figura 7.6. Chip microcontrolador Intel 8051

Para nuestra aplicación, vamos a suponer el uso de un cristal de 12MHz. Nuestro objetivo, es mantener el circuito “apagado” la mayoría del tiempo, como por ejemplo 10 segundos apagados para 1 segundo encendido. Para ello, necesitamos elaborar un timer en lenguaje Ensamblador. Hecho que conseguimos mediante el uso del timer 0 en modo 1 (16 bits) y el uso de un contador, Utilizamos el bit P1.2, pin 3, como salida. Nuestra intención es que dicha patilla polarice un transistor (Q1) como interruptor de la alimentación del sistema, representado en el esquema de la figura 7.7:

NOTA: El código completo bajo el que opera el microcontrolador puede encontrarse en 8.2. *Programa del microcontrolador para el ahorro de energía*

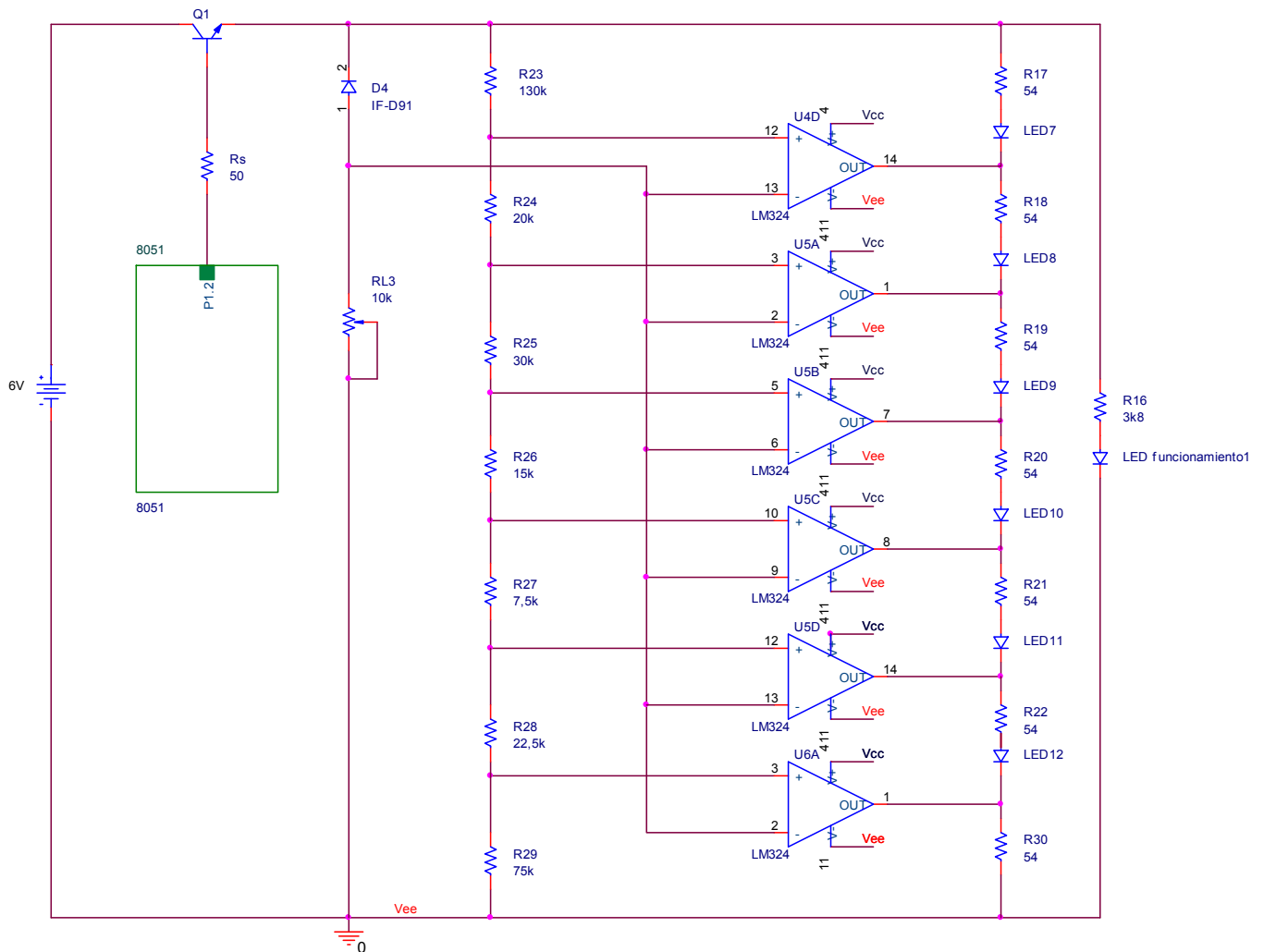


Figura 7.7. Sistema con microcontrolador Intel 8051



8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS



8.1 Conclusiones

En vista de los resultados obtenidos en el laboratorio y tras el estudio desarrollado en este trabajo, se extraen una serie de conclusiones:

1. A pesar de que las pérdidas por curvatura se pueden estimar a partir de la Teoría de Rayos, en las medidas experimentales y dado el proceso de manufactura completamente artesanal; ha sido complicado que exista una uniformidad constante en los valores de pérdidas obtenidos.
2. Existe un compromiso difícil de conseguir entre curvar en exceso la fibra (lo que provoca un gran aumento de las pérdidas de partida, aproximándose a su “saturación” en la medida) y doblar por debajo de lo necesario (en cuyo caso, no se producen prácticamente cambios en presencia de líquidos).
3. Interesa optimizar el número de curvas practicadas para mantenernos fuera de la zona de saturación de las pérdidas, conservando el margen dinámico (ver página 90: *5. Prototipos Sondas Ópticas y Caracterización*)
4. Ventajas que proporciona la galga pelada por tramos y montada sobre tubos:
 - A. La superficie de núcleo que se expone, aunque es menor a otras configuraciones (como es el caso de la sonda completamente pelada), es precisamente aquella superficie que se corresponde con la de las zonas críticas, donde se practican las curvas, es decir, las zonas más sensibles.
 - B. La fibra se protege ante el “efecto mojado”, que se pone de manifiesto al hacer tomas de datos sucesivas.
 - C. Se obtienen mayores rangos de variación en la tensión de salida que en el resto de configuraciones.
5. El coste completo de la aplicación es reducido en comparación con el precio de un paramotor. Este hecho, en combinación a la robustez de las fibras y su inmunidad a campos magnéticos, hablan de la potencial capacidad de extrapolar esta tecnología a otras plataformas con necesidades de determinación de nivel.



8.2 Trabajos futuros

La modificación en la potencia óptica de llegada es evidente a través del cambio en el coeficiente de refracción (medida que determina la reducción de la velocidad de la luz en un medio determinado) del material que rodea al núcleo de la fibra. Sin embargo, hemos encontrado numerosas complicaciones en lo que se refiere a la reproducción fiable de las condiciones de laboratorio, encontrando que estas diferencias eran habitualmente fruto de una variación en la posición del cable de fibra. Ya que dicho cable es muy sensible a torsiones y presiones, que ocasionan también pérdidas y que por tanto si no se discriminan convenientemente pueden enmascarar los resultados perseguidos a través del fenómeno en torno al que gira el actual proyecto. Basándonos en sus principales ventajas con respecto a las fibras tradicionales: menor precio, mayor manejabilidad y facilidad en la realización de conexiones, etc, encuentro que otra fuente viable de materia para futuros proyectos debe ser la medida de desplazamiento o de deformación a través de las pérdidas de potencia de luz de llegada ocasionadas.

Incluso, podrían ser integradas fácilmente a este mismo sistema de mediante la sustitución de la actual sonda por la nueva sonda y recalibrando la salida del fotodiodo o incluso la red de resistencias de referencia. De esta forma podríamos conservar el resto de bloques que conforman este proyecto, configurándose como una plataforma versátil.



9. PLIEGO DE CONDICIONES



El presente proyecto “Desarrollo de un sensor de fibra óptica de plástico para la medida del nivel de combustible en un paramotor” se ha realizado en el Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas del Departamento de Tecnología Electrónica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid.

El objetivo principal del proyecto ha sido el desarrollo de un prototipo de sensor de nivel basado en fibra óptica de plástico para su aplicación en depósitos de combustible de paramotores.

La directora del Proyecto ha sido la Dra. Dña. Carmen Vázquez García, Profesora Titular del Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad Carlos III de Madrid.

Esta línea de investigación, así como el dispositivo realizado y toda la documentación desarrollada, están amparados en el siguiente Pliego de Condiciones:

- ✓ La propiedad intelectual de los estudios realizados en el presente proyecto pertenece por entero a la Universidad Carlos III de Madrid (a partir de ahora, la Universidad)
- ✓ La Universidad se reserva el derecho de la utilización total o parcial del presente Proyecto, bien para su publicación o para su uso en trabajos o proyectos posteriores.
- ✓ En cualquier tipo de reproducción, ya sea para uso particular de la Universidad o para cualquier otra aplicación, se indicará la procedencia, mostrando de manera explícita el nombre del Proyecto, el del ingeniero Ponente, su director y el de la Universidad.
- ✓ Si el proceso pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice en él deberá ser notificada al Ingeniero Ponente del Proyecto, o al director y, según el criterio de éste, la Universidad decidirá o no la modificación propuesta.
- ✓ En el caso de no aceptar dicha modificación, la Universidad declina toda responsabilidad derivada de la aplicación de la misma.
- ✓ La Universidad tendrá prioridad respecto a otros solicitantes en la elaboración de Proyectos Auxiliares que fuesen necesarios para la posible aplicación industrial que pudiera derivarse del presente Proyecto, siempre y cuando no renuncie de manera explícita a este derecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.



9.1 **Material utilizado**

- ✓ Emisor HFBR. Alimentación 6V con conector estándar.
- ✓ Galga pelada por tramos sobre tubos metálicos (semipelada III).
- ✓ Fotodiodo IF-D91. Alimentado a 6 V.
- ✓ 15 Resistores combinados para obtener los valores de resistencia exigidos en 6.3. Sistema final.
- ✓ Amplificador LM 324 (2 chips)
- ✓ LEDs HLMP como visualización. 4 unidades
- ✓ ZOC 2032. Zócalo para acoplamiento de pilas.
- ✓ 2 unidades 2032.



9.2 Presupuesto

9.2.1 Costes de material

Los gastos totales del proyecto consisten en costes materiales y costes de personal. Teniendo en cuenta el coste material (previamente analizado en 6.4 Presupuesto):

Concepto	Unidades	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste(€)
Fibra óptica de plástico	1,5 m	150m	385	3,85
Tubos metálicos soporte	2 (60 cm)	1	0,2	0,4
Resistencias	15	1	0,03	0,45
Fotodiodo IF-D91	1	1	2,19	2,19
Amplificador	2	25	0,066	0,13
Placa circuito impreso	5"	1	0,45 \$/inch	1,78
Pegamento	1ml	10 ml	7,89	0,79
Portapilas ZOC 2032	1	1	0,45	0,45
Batería 2032	2	1	1,2	2,4
LEDS	7	10	1,13	0,79
Velcro negro	8cm ²	25 cm ²	1	0,32
Emisor HFBR 1528	1	1	11,86	11,86
Cable	2	330m	0,003	0,01
Caja opaca (5 x 5cm)	1	1	0,4	0,4
			Total	25,82 €

Tabla 9.1. Costes de material



9.2.2 Costes de personal

Por otro lado, los gastos atribuibles a personal por hora son como sigue:

Trabajador	Sueldo / hora (€)
Ingeniero Técnico industrial	15
Técnico electrónico	10
Secretario	8

CONCEPTO	HORAS	Trabajador	COSTE / HORA (€)	COSTE TOTAL (€)
Diseño	200	Ingeniero Técnico Industrial	15	3000
Caracterización y Pruebas	500	Ingeniero Técnico Industrial	10	5000
Montaje y elaboración del prototipo	100	Técnico de laboratorio	10	1000
Preparación del documento y redacción	50	Secretario	8	400
			Total	9400

Tabla 9.2. Costes de personal



9.2.3 Presupuesto total

Concepto	Coste Total (€)
Costes de material	25,82
Costes de personal	9400
Total	9425,82

Tabla 9.3. Presupuesto total

Por consiguiente, los costes totales del proyecto, incluidos costes de personal y costes de material ascienden a **9425,82 € (nueve mil cuatrocientos veinticinco euros con ochenta y dos céntimos)**.



10. BIBLIOGRAFÍA



- [1]. Leoni-Prinz.
http://www.leoni-prinz-fiber-optics.com/service/kataloge/spezial_lwl_s.pdf
- [2]. U.S. National Academy of Sciences.
http://www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/tec_007520-10.html
- [3]. A.M. Glass, D. J. DiGiovanni, T.A. Strasser, R.E.S.A. J. Stentz, A. E. White, A.R. Kortan, and B. J. Eggleton, "Advances in Fiber Optics". Bell System Technical Journal, vol 5, p.168.2000.
- [4]. System Technical Journal. "Advances in Fiber Optics, Properties of Plastic Optic Fibers".
- [5]. RS Online
<http://www.amidata.es/cgi-bin/bv/rswwww/home.do?cacheID=esie&returningUser=N>
- [6]. Mitsubishi Rayon .Co., Ltd: Eska-Miu.
<http://www.pofeska.com>
- [7]. Asahi Glass Co., Ltd.: Lucina.
<http://www.agc.co.jp/lucina/index.htm>
- [8]. Nexans.
<http://www.nexans.com>
- [9]. OFS
<http://ofsoptics.com>
- [10]. Opto & Laser Europe, vol. 72, p.49, 2000. R. Szweda, "PlasticOptical Fiber budgets the gap between glass and copper".
- [11]. Proceedings of the ninth international conference on plastic optical fibers and applications. POF'00, Boston (USA), Sept. 2000, p. 8-11. M. Naritomi. "Model home project in Japan using GI-POF".
- [12]. Geometric Optics Theory of Multi-Step Index Optical Fibers. Gotzan Aldabaldetrekue, Bilbao, p. 12.Junio 2006
- [13]. "Liekki Co."
<http://www.liekki.com>
- [14]. Oficina de Comunicaciones UTP
http://gda.utp.edu.co/pub/nuevas_tecnologias/fibra_optica/F.O%20CAP%CDTU LO%208.ppt



[15]. IFM Electronics: Opto Times, “Novedades en Ciencia y Tecnología. Fibras ópticas para sistemas de protección de peatones”.

<http://www.ifmefector.com/obj/optoTimes-8-06-ES.pdf>

[16]. M. Lomer, J. González, J. Echevarría, M. A. Quintela, R. Garcia, J. M. López Higuera. E.T.S.I.I Telecomunicaciones, Universidad de Cantabria. “Sensor de desplazamiento con fibras ópticas plásticas”.

http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos_villaviciosaodon_2001/articulos/138.pdf

[17]. M. Lomer, G. Chuan, J. Zubía, A. Cobo, M. Quintela, J.M. López-Higuera
Grupo de Ingeniería Fotónica, Departamento TEISA Universidad de Cantabria.

“Nuevo sensor de desplazamiento basado en redes de difracción utilizando fibras ópticas”.

http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos_coruna_2003/actas_pdf/SESSION%201/S1.%20Aula%202.3/1266%20-%20NUEVO%20SENSOR.pdf

[18]. Leuze Electronic, Direct Industry

<http://www.directindustry.es/prod/leuze-electronic/horquilla-optica-4741-12619.html>

[19]. Maxell Hitachi Corporation. Product Lineup

<http://www.maxell.com.jp>

[20]. Wise Components Website.

<http://www.datacomtools.com>

[21]. Rifocs Corporation. 557b Power Meter, technical specifications

<http://www.testmart.com>

[22]. TX Communicatios. Fiber Optic Connectivity

<http://www.tccomm.com/Esp/TC3820.htm>

[23]. Photonic Products Ltd. Data sheet HL6339G/42G

http://www.photonic-products.com/products/laserdiodes_visible/hitachi_visible_ds/hl6339g_42g.pdf

[24]. Phyltec INC. Product data sheet, Fiberoptic Sensor RC-20

<http://www.scantron-net.co.uk/pdf/RC20.pdf>

[25]. Wikipedia Org.

http://en.wikipedia.org/wiki/Intel_8051

[26]. OMRON Industrial Automation

http://www.ia.omron.com/product/family/1917/index_fea.html



- [27]. Sick Sensor Intelligence
<http://www.kmsomerinca.com.ve/sensick.htm>

- [28]. Carmen Vázquez. Material docente: Análisis de la tecnología de fibras ópticas. Dpto. Tecnología Electrónica, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid.

- [29]. Conetrónica, nº 95. Francisco Ramos Pascual. “Fibra óptica de plástico para comunicaciones de datos”.
<http://www.radioptica.com/Fibra/pof.asp?pag=4>

- [30]. El Paramotor. Wikipedia
<http://www.google.es/search?sourceid=navclient&hl=es&ie=UTF-8&rls=GFRD,GFRD:2007-18,GFRD:es&q=EL+PARAMOTOR+ORIGENES>

- [31]. Clemente Paramotor, Dos Hermanas (Sevilla)
<http://www.clementeparamotor.com/es/noticias/index.php>

- [32]. P.A.P Team Paramotores, Estepona (Málaga)
<http://www.papteam.com/paramotores.htm>

- [33]. Airfer Paramotores, Socuéllamos (Ciudad Real)
<http://airfer.com/detalle.php?detalle=18>

- [34]. H&E Paramotores, Valdilecha (Madrid)
<http://www.he-paramotores.com/index.php?secc=2>

- [35]. Agustín Guillén. Geocities. Artículo seguridad parapente– paramotor.
<http://www.geocities.com/pipeline/1370/ParamotorSeguridad.htm>

- [36]. PXP Parapente - Paramotor, Granada
http://www.pxp.es/espanol/es/dept_633.html

- [37]. NAC Intercom
http://www.nac-inter.com/product_info.php?cPath=1_19&products_id=117&language=es&osCsId=414ec7f3f46def96f765bf33a5cb5cac

- [38]. Tiny Tach, Design Technology Inc. Westmont, Illinois.
<http://www.tinytach.com/tinytach/gasoline.php>

- [39]. Diotronic S.A. Componentes Electrónicos
<http://www.diotronic.com/enlaces.html>

- [40]. Avago Technologies



[http://www.avagotech.com/products/optical_transmitters/general_purpose,_industrial_control_data_link_\(650nm\)/hfbr-1528/](http://www.avagotech.com/products/optical_transmitters/general_purpose,_industrial_control_data_link_(650nm)/hfbr-1528/)

[41]. D. Donlagic and B. Culshaw, "Propagation of the fundamental mode in curved graded index multimode fiber and its application in sensor systems", J. Lightwave Technology, 18, 334, 2000.

[42]. K.T.V. Grattan and B.T. Meggit, "Optical Fiber Sensor Technology", Chapman & Hall, Great Britain, 1995.

[43]. M. Lomer, D. Blanco, Joseba Zubía, C. Jáuregui, J.M. López-Higuera, "Sensor de nivel de líquido multipunto basado en pérdidas de curvatura basadas en FOP", URSI 2005, Gandía, España. 2005.

[44]. Andreas Weinert, "Plastic Optical Fibers. Principles, components, installation." Pág 42. Siemens, Alemania, 1999.

[45]. Art Photonics. Advanced Research and Technology in Photonics." Fiber Design and Attenuation Spectrum"
<http://www.artphotonics.de/POF/001/index.php>



11. ANEXOS



11.1 Programa del microcontrolador para el ahorro de energía

(Nota: todas los anexos se incluyen en la copia electrónica del proyecto)

```

NAME ENERGIA

SNOMOD51

SINCLUDE (em2051)

EXTRN CODE (emulador)

CONTADOR EQU 39H

ORG 00H

JMP INICIO

ORG 40H

INICIO:  LCALL emulador

        MOV TCON, #11H;          tr0 ON & falling edge ON

        MOV TMOD, #01H;          tr0 modo 1

        MOV IE, #82H;            EA=1 & ET0=1


ON:      MOV CONTADOR, #0FH;      descargas para 1s

        SETB P1.2;                polarizamos transistor->ON

        JMP INT_TIMER0


OFF:     MOV CONTADOR, #98H       descargas para 10s

        CLEAR P1.2;               cortamos transistor->OFF

        JMP INT_TIMER0

        JMP ON;                   cierre del bucle

        END


INT_TIMER0: MOV TH0, #BDH;        precarga comun para las 2 temporizaciones

        MOV TL0, #TL0

        SETB TR0;                 arrancamos timer0

        ESPERA:  JNB TFO, ESPERA;  esperamos al flag de overflow timer0

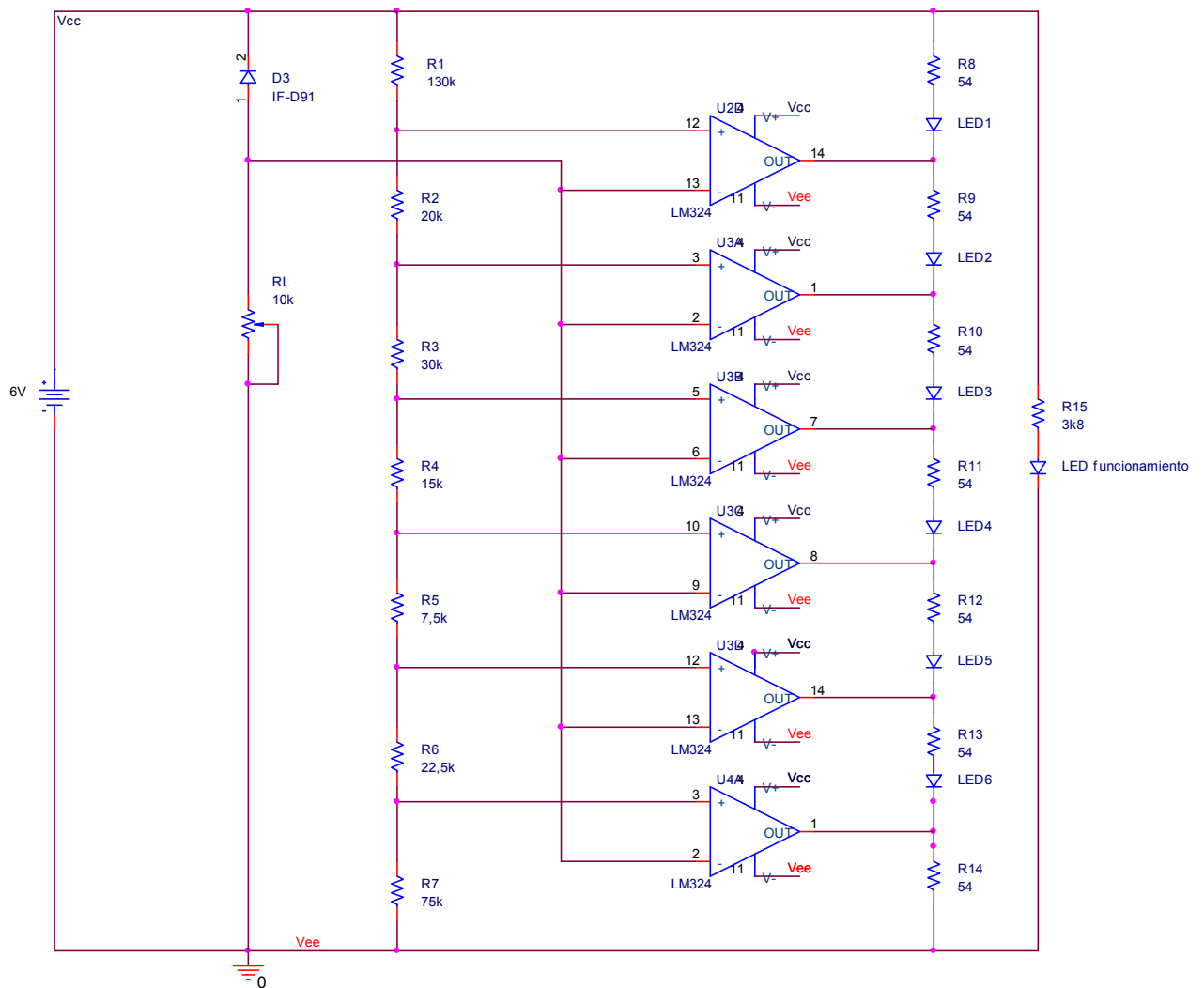
        DJNZ CONTADOR, INT_TIMER0  ciclos temporización

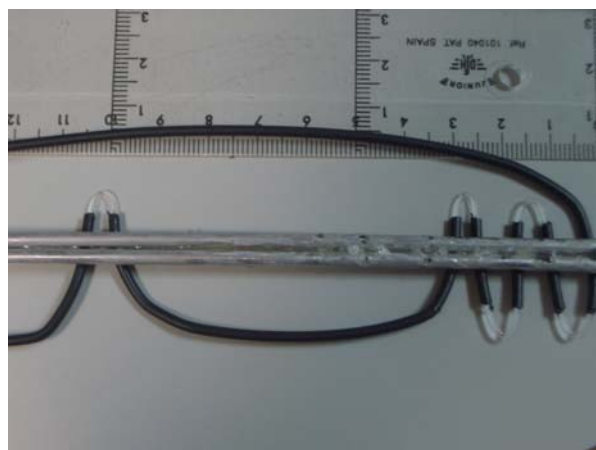
        RETI

```

11.2 Planos

11.2.1 Esquemático del sistema







11.3 Hojas de características

- ✓ Microcontrolador 8051
- ✓ HFBR RUS 500
- ✓ IF-D91
- ✓ LED HLMP
- ✓ Amplificador LM 324
- ✓ Maxell CR-2032
- ✓ OLS1
- ✓ TL 081